



Samspil mellem vandstand i vandløb og de omliggende dyrkede arealer

Bidrag til Udredning om grødeskæring

Styczen, Merete Elisabeth; Hansen, Søren; Petersen, Carsten Tilbæk; Abrahamsen, Per

Publication date:
2016

Document version
Også kaldet Forlagets PDF

Citation for published version (APA):

Styczen, M. E., Hansen, S., Petersen, C. T., & Abrahamsen, P., (2016). *Samspil mellem vandstand i vandløb og de omliggende dyrkede arealer: Bidrag til Udredning om grødeskæring*, 43 s., mar. 31, 2016.



SAMSPIL MELLEM VANDSTAND I VANDLØB OG DE OMLIGGENDE DYRKEDE AREALER

BAGGRUNDSPAPIR TIL UDREDNING OM GRØDESKÆRING



**Titel: Samspil mellem vandstand i vandløb og de omliggende dyrkede arealer.
Baggrundspapir til Udredning om Grødeskæring.**

Forfattere

M.Styczen, S. Hansen, C.T. Petersen og P. Abrahamsen

Institut for Plante- og Miljøvidenskab
Københavns Universitet
Thorvaldsensvej 40
1871 Frederiksberg C
Tlf. 3533 3560
PLEN@plen.ku.dk
www.plen.ku.dk

Opdragsgiver

Naturstyrelsen

Forsidefoto

K.G. Gyldengren

Publicering

Rapporten er publiceret på www.plen.ku.dk

Bedes Citeret

M.Styczen, S. Hansen, C.T. Petersen og P. Abrahamsen (2016). Samspil mellem vandstand i vandløb og de omliggende dyrkede arealer. Baggrundspapir til Udredning om Grødeskæring (Naturstyrelsen). Institut for Plante- og Miljøvidenskab, Københavns Universitet. 39 s. <http://plen.ku.dk/myndighedsbetjening/>.

Gengivelse er tilladt med tydelig kildeangivelse

Skriftlig tilladelse kræves, hvis man vil bruge instituttets navn og/eller dele af denne rapport i sammenhæng med salg og reklame.

Indholdsfortegnelse

BAGGRUND/FORORD	1
DEN TILGRUNDLIGGENDE HYDROLOGI.....	2
Arealernes karakteristika	3
Drænkriterier og hyppighed af overskridelser	4
Klimabetingede ændringer, der kan påvirke hyppigheden.....	6
Vandføringsmæssige ændringer, der kan påvirke hyppigheden	7
Grødeskæring.....	7
Forskelle mellem jordtyper.....	8
Humusjorde	8
Mineraljorde	9
Andre årsager til dårlig afdræning	10
AFDRÆNINGSBEHOV I FORHOLD TIL LANDBRUGSAKTIVITETER.....	11
EKSEMPLIFICERING AF SAMMENHÆNGE MELLEM VANDSTANDEN I VANDLØB OG AFVANDING EN MARK (TOKKERUP).	12
EFFEKTER AF RINGE AFVANDING PÅ LANDBRUGSDRIFT	20
Denitrifikation og lattergasproduktion	20
Jordtemperatur	21
Rodudvikling – og roddybde på forskellige afgrøder	21
Udbytteeffekter.....	21
Andre effekter	22
Dyrkningsmæssige aspekter i et fremtidigt klima	22
KONKLUSION.....	23

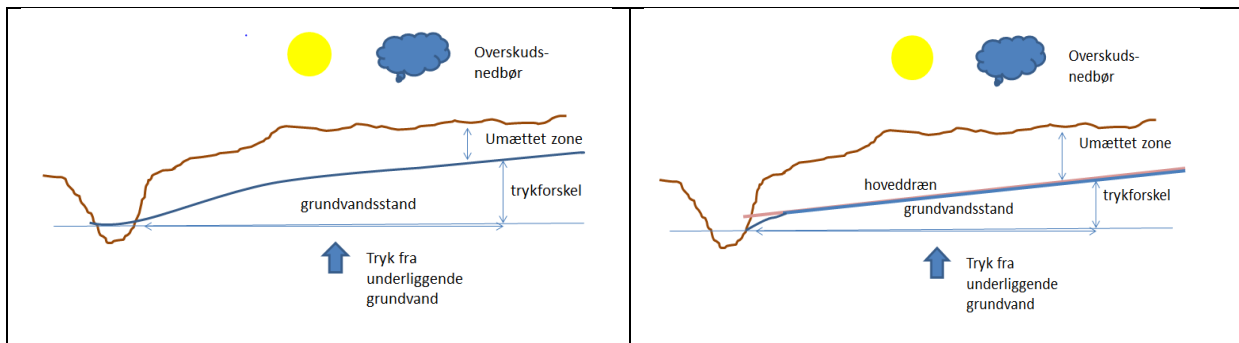
REFERENCER	24
APPENDIX 1: ALMINDELIGE DESIGNKRAV TIL DRÆNSYSTEMER.	27
APPENDIX 2: SIMPLE, STATISKE BEREGNINGER AF GRUNDVANDSSTANDENS PLACERING UNDER FORSKELLIGE FORHOLD VED HJÆLP AF HOOGHOUDS LIGNING	28
Hooghoudts ligning.....	28
Anvendelse af ligningen til vurdering af afdræning i forhold til vandløb.....	29

BAGGRUND/FORORD

Dette tekniske baggrundsnotat er udarbejdet som en del af en faglig udredning om grødeskæring i vandløb, bestilt af Naturstyrelsen. Den beskriver, hvordan omliggende arealer er påvirket af en vandstand i åen, og hvornår det har en betydning for dyrkede arealer. Grødevækst er én faktor, der kan påvirke vandstanden, men andre faktorer, som sedimentation, øget nedbør, byudvikling og infrastruktur kan også påvirke den aktuelle vandstand. Arbejdets hovedkonklusioner indgår i rapporten "Faglig udredning om grødeskæring i vandløb."

DEN TILGRUNDLIGGENDE HYDROLOGI

Vandstanden i vandløbet kan betragtes som en randbetingelse for den naturlige afdræning fra de øverste meter i det omgivende landskab. Jo tættere vandstanden i vandløbet ligger på det omliggende lands terrænkote, jo større risiko er der for at vandstanden i vandløbet begrænser afdræningen. Figur 1 viser hvordan grundvandsstrømningen til vandløbet drives af trykforskellen (H) mellem grundvandsstandens højde og vandstanden i vandløbet. Trykforskellen vil variere over tid. Den vil stige, når der er et nedbørs-overskud, og den kan endvidere være påvirket af trykforholdene i dybere grundvandsmagasiner. H er jordtype-afhængig: Stigningen ved overskudsnedbør er normalt relativt lille i sandjorde, dels på grund af den høje porøsitet (stort drænbart porevolumen) og dels på grund af en høj hydraulisk ledningsevne, mens den er relativt stor i lerede jorde, med anderledes retentionsegenskaber og lille hydraulisk ledningsevne. Jordbundsvariation kan være en vigtig faktor, fordi selv tynde horisontale sandlag kan forbedre afdræningen i en ellers leret jord. I længere perioder med negativ nettonedbør (primært om sommeren) kan grundvandsstanden i oplandet blive lavere end vandstanden i vandløbet. Det gælder især i lerede jorde, hvor lave hydrauliske ledningsevner begrænser udvekslingen af vand i vandløbet med det omgivende land.



FIGUR 1. SKITSE TIL ILLUSTRATION AF GRUNDVANDETS BELIGGENHED I AFSTAND AF VANDLØBET, UDEN OG MED DRÆN INDLAGT.

Afstanden mellem jordoverfladen og grundvandsspejlet betegnes afvandingsdybden. Risikoen for, at afvandingsdybden bliver lille, afhænger af både grundvandsstanden og topografien. Den er størst i et relativt fladt landskab med lerede jorde, hvor afdræningen mod vandløbene foregår langsomt. Hvis arealet er fladt, vil afvandingsstiltstanden, som følge af grundvandsspejlets stigning, være dårligst længst væk fra vandløbet (Figur 1), dels fordi eventuelle dræn vil ligge højere her (der dimensioneres med et fald mod vandløbet), og fordi der kan opbygges et større grundvandstryk.

Ved etablering af dræn øges afdræningsmulighederne for jordprofilen over drænet. Under drænet bestemmes strømmingen af de samme forhold som tidligere.

I naturligt dræned arealer påvirker vandstanden i vandløbet afdræningen via grundvands-strømningen. I dræned arealer er afstrømningen over drænet primært (men ikke udelukkende) styret af drænene. Der er en påvirkning fra grundvandsstrømningen, fordi en nedsat afstrømning via grundvand betyder, at mere vand skal transporteres via drænene. På de dræned jorde er det vigtigt, at drænene fungerer efter hensigten, og vandstanden i vandløbet påvirker dette, hvis den står over drænets udløb. Begge situationer diskuteres nærmere i det følgende.

Arealer med højt grundvand om sommeren vil primært være lavbundsarealer (lave, flade arealer), mens de dræned arealer både kan være lavbundslande og arealer med dårlig hydraulisk ledningsevne på grund af jordbundens tekstur og struktur. Den sidste gruppe er typisk (men ikke udelukkende) jorde dannet på moræner i Østjylland og på Øerne. Breuning-Madsen et al. (1992) har kortlagt det generelle drænbehov.

AREALERNE KRAKTERISTIKA

Lavbundsarealernes udbredelse og overlap med landbrugsarealer er undersøgt i forskellige studier. Greve et al. (2013) baserer deres studier af ændringer i tørvedække over de sidste 35 år på et bruttoareal på 730.000 ha som dækker dyrkede jorder med vegetation, der indikerer våde forhold. Dette er ifølge forfatterne valgt på baggrund af en stærk sammenhæng mellem arealanvendelse på historiske kort (fra 1810-22 og fremad) og dræforhold i jorde. Med et landbrugsareal på 2.63-2.65 mill ha udgør det ca. 27 % af det nuværende landbrugsareal. Dette areal foreligger ikke som landsdækkende GIS-tema, da kun enkelte mindre områder af de gamle kortmaterialer fra 1810-22 er blevet oprettet og overført til digital form (Nilsson et al., 2015).

Institut for Agroøkologi (Mogens Humlekrogh Greve, Mette Balslev Greve m.fl.) har lavet et landsdækkende GIS-tema over lavbundsarealer, som er det oprindelige tema over lavbundsarealer kortlagt på grundlag af vådbundssignatur på kort fra begyndelsen af 1900-tallet, suppleret med GEUS' lavbundsjordarter fra de kvartærgeologiske kort 1:25.000 og 1: 200.000, humusjordene fra jordklassificeringen fra begyndelsen af 1970'erne samt data fra okkorkortlægningen 1981-1983. Det samlede vådbundsareal på dette tema (som kaldes "det udvidede lavbundstema") er 9035 km² eller ca. 21 % af det danske landareal. Heraf var 593,800 ha anvendt til landbrug. En ny opgørelse (H.E: Andersen, DCE) viser, at i 2014 er dette areal reduceret til 380.938 ha (ca. 14.5 % af landbrugsarealet i omdrift).

Forskellen på de to vurderinger af omfanget af våde arealer skyldes sandsynligvis, at dræning med rør påbegyndtes allerede i 1850'erne, og at visse arealer derfor ikke fremstod våde ved kortlægningen i 1900-tallet. Breuning-Madsen (2010) formoder, at mindre end 2 % af arealet var drænet, før rørdreningen påbegyndtes.

Forskellige omstændigheder kan have ændret på forekomsten af jorder, der naturligt ville fremstå våde. For det første, kan grundvandsstanden være sænket af større afvandingsprojekter både i forbindelse med landbrug og byudvikling og af vandindvinding i de sidste 100-150 år. Lokale potentialkort og nedslivnings-kort (GEUS) samt kendskab til vandindvindingspåvirkede områder vil kunne medvirke til at indsnævre områder, hvor grundvandspotentialer er højt, og hvor samspillet mellem vandstand i vandløb og dynamikken på de omliggende arealer kan være af betydning. For det andet betyder stigende nedbørsmængder, at områder, der ikke var voldsomt vandlidende tidligere, kan være mere vandlidende nu, som diskuteret i Karlsson et al. (2010). For det tredje kan lokal infrastruktur som f.eks. rørunderføringer og ændringer af de oprindelige afdræningsforhold have indflydelse på opstrøms arealer.

"Det udvidede lavbundstema" er i øjeblikket det bedste udgangspunkt for at vurdere udbredelsen af arealer med høj og ret konstant grundvandspåvirkning. Olesen (2007) analyserede landbrugsarealet inden for "det udvidede lavbundstema", og fandt stort set alle typer topjord repræsenteret (jf. JB-numrene i Tabel 1). Jordene er også klassificeret i forhold til geologisk jordart, og med ca. 288.000 ha af forskellige former for sandaflejringer, 51.000 ha af ferskvandsler og moræne, 144.000 ha af ferskvandstørv og ca 70.000 af gytjedannelser. Der er en overvægt af sandede topjorde på sandet geologi og af humusjorde på tørv/gytje, men for andre topjorde er sammenhængen ikke god. De hydrauliske forhold i sand betyder, at grundvandsstanden mellem vandløb kun vil indstille sig lidt højere end i åen (få promille, men dog afhængigt af sandets beskaffenhed), og en ændring i vandstanden i åen kan derfor relativt let vurderes som forskellen mellem vandstanden i åen og jordoverfladen og ekstrapoleres med en vis gradient til det omgivende område (Se Appendix 2 for statiske beregninger). For de meget sandede jorde i denne kategori forbedres afdræningen derfor ikke væsentligt ved hjælp af drænrør, med mindre vandet kan pumpes væk. Her er det den naturlige afdræning, der påvirkes af vandstanden i åen.

TABEL 1. OPDELING AF LANDBRUGSUDNYTTET LAVBUNDSJORD (UDVIDET AREAL) PÅ JB-NUMRE OG SIMPLIFICERET GEOLOGI (1000 HA). SIMPLIFICERET EFTER OLESEN (2007). JB1: GROVSANDET JORD, JB2: FINSANDET JORD, JB3+4 GROV OG FIN LERBLANDET SANDJORD), JB5+6: GROV OG FIN SANDBLANDET LERJORD, JB 7: LERJORD, JB8-10: SVÆR OG MEGET SVÆR LERJORD, SILTJORD, JB11: HUMUSJORD, JB12: SPECIEL JORDTYPE. KOMBINATIONER ANGIVET MED "FEDE" TAL ER GENNEMREGNET I APPEENDIX 2.

	Tørv/gytje ¹	Ler ²	Sand ³	Øvrige	I alt
JB1	25,8	3,9	85,9	4,8	120,4
JB2	17,4	3,9	64,5	5,1	90,9
JB3+4	45,1	16,0	51,0	7,2	119,3
JB5+6	31,0	12,4	12,9	2,2	58,5
JB7	5,7	3,4	4,7	3,4	17,2
JB8-10	1,8	0,6	2,4	11,8	16,5
JB11	84,4	9,3	64,4	6,9	164,9
JB12	2,3	1,9	1,5	0,5	6,2
I alt	213,3	51,2	287,5	41,8	593,8

¹: klasserne Ferskvandsgytje, Ferskvandstørv og Saltvandsgytje er slået sammen.

²: Klasserne Ferskvandsler, Saltvandsler og Moræneler er slået sammen.

³: Klasserne: Ferskvandssand (glaciale), Flyvesand, Ferskvandssand (postglaciale), Ferskvandsaflejringer (dækker over en blanding af sand, ler, tørv og gytje), Saltvandssand og Ferskvandssand (senglaciale) er slået sammen.

De øvrige jorder i lavbundstemaet, der bruges til landbrug, vil være drænedes med rør eller grøfter, men afdræningsdybden (ved udløb) begrænses af vandstanden i åen, da der normalt stilles krav om, at drænene skal have frit udløb. Topografien kan, som nævnt ovenfor, begrænse tykkelsen af jordlaget over drænet. Grøfter er valgt, når arealerne er for flade til, at drænrør kan lægges med tilstrækkelig hældning. På de fleste drænedes jorde er dræn placeret i ca. 1,2 m's dybde, men i sandjorde med under 5% ler anbefales at drændybden er 0,7-0,9 m, og i jord med meget lille hydraulisk ledningsevne lægges drænene i ca. 1 m's dybde (Se Aslyng, 1980 og SEGES, 2015 for detaljer). Lavbundsarealerne kan have områder, hvor drænene er lagt højere for opnå tilstrækkeligt fald til vandløbet.

Som nævnt ovenfor er en stor del af det drænedes areal i Danmark (moræne-)ler, som kun udgør en meget begrænset del af lavbundstemaet (knap 38.000 ha). Det er betydeligt vanskeligere at vurdere, hvor store områder, der her (og på øvrige drænedes arealer) er påvirket af vandstanden i vandløb eller grøfter.

DRÆNKRITERIER OG HYPPIGHED AF OVERSKRIDELSER

Dræn er, uanset om de er installeret på lavbunds- eller højbundsjorde, dimensioneret efter at kunne fjerne vand i zonen over drænene. Dimensioneringen af rørene sker ud fra en vurdering af hvor meget vand der skal fjernes (primært regnvand eller regnvand og grundvand) og rørenes hældning. Retningslinjerne for dimensionering er gamle og stammer fra en tid, da de primære afgrøder var vårafgrøder. Drænudløbets placering fastsættes efter, at drænene har frit udløb i forhold til middelvandstanden i marts (Aslyng, 1980)1,

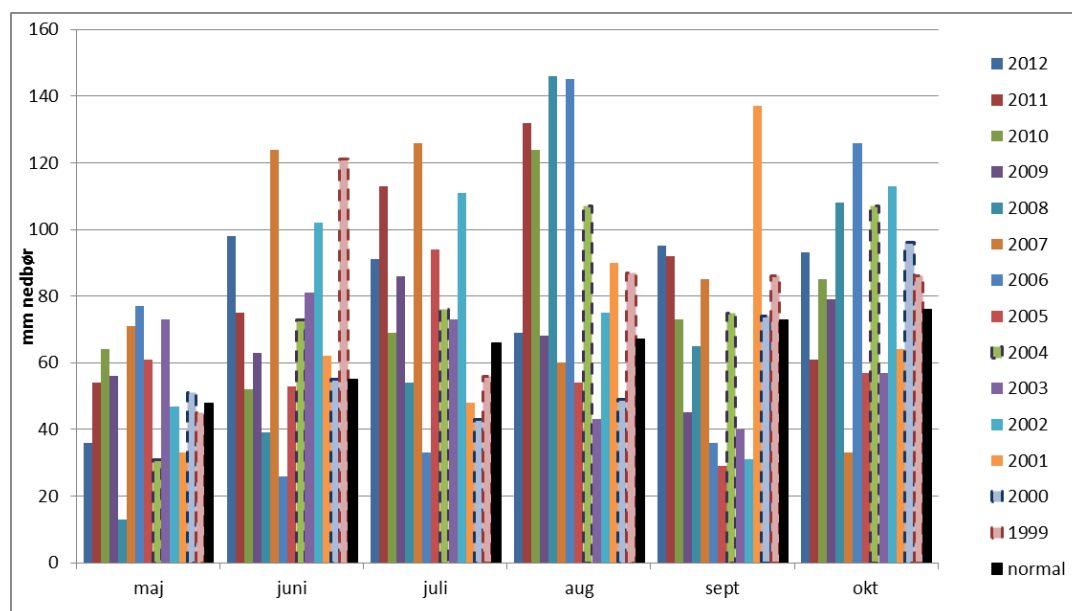
¹ Dog ikke dræn i okker-påvirkede områder.

og med en forventning om, at vandstanden kun kortvarigt oversvømmer drænudløbene. Så længe vandstanden i vandløbet er under drænenes udløbskote, har ændringer i vandstanden (f.eks. som følge af grødeskæring) minimal indflydelse på afdræningen over drænene. Et simpelt kriterie for, at afdræningen er påvirket af vandstanden i vandløbet, kunne være, at drænenes oprindelige designkriterier ikke overholdes.

”Kortvarigt” er imidlertid ikke nogen klar definition, og hvis dette skal kvantificeres yderligere, er det nødvendigt at definere en acceptabel hyppighed og varighed af overskridelser (for både sommer og vinter). Der findes i øjeblikket ikke retningslinjer for, hvad en acceptabel hyppighed er for danske drænsystemer.

”Hyppigheden” afhænger af variationen i vejret fra år til år. Der er i gennemsnit negativ nettonedbør i april-august måned, hvorefter jordens magasin opfyldes igen. Figur 2 viser imidlertid, at variationen i månedsnedbør over årene på landsplan er betydelig, og variationen vil kunne være endnu større lokalt.

Effekten af oversvømmelse af drænudløb er størst tættest på åen, hvor drænsystemets kote er lavere end vandstanden i åen, men afdræningen i det opstrøms areal forsinkes også, fordi gradienten, der skal drive den underliggende grundvandsstrømning, er formindsket.



FIGUR 2. MÅNEDSVÆRDIER FOR NEDBØR I DANMARK (LANDSGENNEMSNIT) FOR MAJ TIL OKTOBER I PERIODEN 1989 TIL 2012. NORMALVÆRDIER FOR PERIODEN 1960-1990 ER INDSAT TIL SAMMENLIGNING. KILDE: [WWW.DMI.DK](http://www.dmi.dk) SAMT CAPPELEN OG JØRGENSEN (2011).

I sommerperioden vil drænedede morænelersområder og drænedede lavbundsarealer derfor kunne påvirkes af grøde, hvis vandstanden som følge af grødevækst og en eventuel bundændring som følge af sedimentation i grøden overstiger drænudløbets kote med mere end acceptabel hyppighed. Længden af hoveddræn, der oversvømmes, vil være en funktion af vandstanden over drænudløbene. Faldet på hoveddrænledninger er typisk 2-3 ‰, men kan være ned til 1‰. 5 cm's neddykning vil betyde oversvømmelse af ca 25 m hoveddrænledning med et antaget fald på 2 ‰, mens 20 cm's overskridelse tilsvarende vil oversvømme ca. 100 m hoveddrænledning og forsinke afdræningen. En forhøjet grundvandsstand påvirker vandindholdet i hele det overliggende jordprofil, så langsommere afdræning betyder at vandindholdet er forhøjet i hele profilet i længere tid, end hvis drænene kunne have løbet frit. Topografien i oplandet vil spille en rolle. Mere kuperede morænelersområder er typisk ikke systemdrænedede, og risikoen for at oversvømme dræn vil være mindre, hvis dræn er lagt med større fald.

Effekten af høj nedbør på vandindholdet i jorden og afstrømningen til vandløb afhænger af vejret i den foregående periode, og en vurdering af effekten på landbrugsarealerne kræver hydrologisk modellering, der tager både historikken og ekstremhændelsen i betragtning. Et eksempel er vist i Figur 8. kap 0.

Alle de faktorer, der påvirker vandstanden i et vandløb, vil kunne påvirke denne hyppighed, herunder klimaændringer, ændringer i strømningsprofilen eller hældningen på vandløbet, sedimentation og grøde.

KLIMABETINGEDE ÆNDRINGER, DER KAN PÅVIRKE HYPPIGHEDEN

Nedbøren i Danmark er steget over de sidste 150 år. Kronvang et al (2006) og Larsen et al. (2005) har dokumenteret stigninger i nedbør i perioden fra 1917-2000. I Sønderjylland er nedbøren steget med ca. 3 mm/år, svarende til 255 mm i perioden 1917 til 2000, mens nedbøren målt ved klimastationen ved Landbohøjskolen på Frederiksberg er steget med ca. 0,95 mm/år eller 80 mm i samme periode. Samme forskere har fundet en stigning i den årlig middelfafstrømning ved alle analyserede stationer, "med størst stigning i de sønderjyske vandløb, der afvander til Vadehavet, og mindre i vandløbene nord og øst herfor". Stigningerne i afstrømning på Sjælland i perioden 1920-2000 ligger i intervallet 33-83 mm, på Fyn mellem 33 og 38 mm og i Jylland fra 7-218 mm. Sammenhængen mellem nedbørsstigning og øget afstrømning er klarest i vinterperioden, hvor fordampningen er lille, mens forholdene om sommeren også er påvirket af, i hvilken grad vinterne nedbøren fører til højere grundvandsdannelse (Larsen et al., 2005). Det betyder overordnet, at effekten om sommeren, alt andet lige slår kraftigere igennem i sandede vestjyske åer, der modtager grundvand, end i østdanske morænelers-områder, hvor grundvandstilstrømningen er ringe. Karlson et al. (2010) konkluderer i et studie af området omkring og ved Skjern Å, at nedbøren over de sidste 150 år er forøget med 2,7 mm pr år, hvilket har medført grundvandsstigninger og en stigning i vandføringen på 133 mm over 100 år (fra godt 400 mm) i Skjern Å. I hvilket omfang den øgede afstrømning har ført til vandstandsstigninger i vandløbet, afhænger af om vandløbsprofilen også er ændret i den pågældende periode.

Kronvang et al (2006) har estimeret fremtidige ændringer i afstrømning på basis af klimamodel-beregninger for 2071 (HIRHAM, IPCC A2-scenarie). Hovedresultaterne er en stigning i gennemsnitlig årlig afstrømning mellem 9 og 44%, med et landsgennemsnit på 18 %. De største stigninger ses i Vestjylland og Sønderjylland, mens afstrømningsændringerne i Nordsjælland forventes at blive små. Henriksen et al.(2013) har, på basis af en række klimamodeller og hydrologiske modelberegninger estimeret fremtidige ændringer i ekstremnedbør, og beregnet ændring i hyppighed af forskellige hændelsestyper i perioden 2021-2050. Afstrømningen i f.eks. en 10-års-hændelse er dernæst sat i forhold til, hvad afstrømningen var i en 10-årshændelse i 1961-1990, og forholdet benævnes "klimafaktor". Klimafaktorer er bl.a. beregnet for 10-års maksimumsafstrømning for sommerperioden 1/5 – 1/10. Særligt høje værdier (>2, svarende til mere end dobbelt så meget afstrømning) er beregnet for Lolland/Falster, med et 95%-konfidensinterval på 1,45-2,74, mens klimafaktoren for den sydlige halvdel af Sjælland ligger i kategorien 1.5-2. 95%-konfidensintervallet for hele Sjælland er angivet til 1,29-1,66. En stor del af Jylland forventes at have mindre stigninger i ekstremnedbør men i stedet en større grundvandsstigning.

Sammenhængen mellem den fremtidige afstrømning og vandstand er ikke simpel, da mere afstrømning og specielt større ekstremhændelser vil påvirke tværsnitsprofilen i naturlige vandløb. Dette kan omvendt modvirkes af etableret infrastruktur som rørlægninger, der f.eks. kan sætte en grænse for hvor meget dybere et vandløb kan grave sig ned. Men de større ekstremhændelser, især på Sjælland og Lolland vil forventeligt give anledning til flere og/eller længere perioder i sommerhalvåret, hvor behovet for afdræning er stort og risikoen for oversvømmelse er øget.

Minimumsvandføringer i sommerperioden forventes at stige i det vestjyske område på grund af større grundvandsdannelse. I en del østdanske vandløb er vandføringen allerede nu meget lav i sensommeren, og der er risiko for alt for lave vandføringer og vandstande i vandløbet til at sikre overlevelsen af smådyr og især fisk. Egentlig udtørring forekommer ofte. Dette fænomen kan forventes at blive hyppigere i fremtidens klima, hvor

vandføringen i gennemsnit forudses at stige fra sen efterår til tidlig forår men falde i sensommeren (Søndergaard et al. 2006). Henriksen et al. (2013) beregner gennemsnitlige klimafaktorer for medianminimumsvandføring på 1 eller lidt mere end 1. For Sjælland, Lolland-Falster og Danmark som helhed er værdierne henholdsvis 1,09; 1,02 og 1,08., men de laveste estimater er mindre end 1, hhv. 0,95; 0,97 og 0,94 for de samme regioner. Den samtidige risiko for ekstremhændelser indikerer, at variationerne fra år til år kan blive betydelige.

Da ovenstående kriterie er baseret på en acceptabel hyppighed af neddykning af dræn, fremgår det også at det påvirkede areal må forventes at øges, hvis klimaforandringer øger hyppighed af ekstremhændelser.

VANDFØRINGSMÆSSIGE ÆNDRINGER, DER KAN PÅVIRKE HYPPIGHEDEN

Iversen og Ovesen (1997) undersøgte danske vandløb i perioden 1976 til 1995 og fandt, at der var sket en reduktion i vandføringsevnen i omkring halvdelen af de undersøgte vandløb, mens vandføringen var forøget i godt 10 % af vandløbene. I resten af vandløbene var forholdene uændret. "I de vandløb, hvor vandføringsevnen var reduceret, svarede det til en vandstandsstigning på gennemsnitligt ca. 16 cm, og i de enkelte vandløb varierede stigningen mellem 4 og 42 cm. Vandstandsstigningerne er sket både i sommer- og vinterperioden". Iversen og Ovesen (1997) nævner to forhold, der kan være medvirkende årsag til dette, nemlig ændret vedligeholdelsespraksis og en række milde vintre efter 1986 (uden sneafsmeltningshændelser). Med hensyn til vedligeholdelsespraksis nævnes, at "reduktionen i vandføringsevne i de fleste tilfælde falder sammen med myndighedernes ændrede praksis for vandløbsvedligeholdelse, hvor grødeskæring er begrænset til en strømmende, der er smallere end vandløbet med en gradvis indsnævring af vandløbet til følge. Denne praksis er indført i erkendelse af, at vandløbsmyndighederne ikke er berettigede til at vedligeholde vandløbene ud over de dimensioner, der er fastlagt i regulativerne".

Ovesen et al. 2015 beskriver udviklingen i vandføringsevne for 27 stationer med reduceret vedligeholdelse fra 1990-2012, og finder at der for 18 er sket en signifikant forøgelse af vandstanden i sommerperioden (maj-oktober) svarende til en reduktion af vandføringsevnen. For de øvrige 7 stationer er der ikke konstateret en signifikant udvikling. I gennemsnit er vandstanden i sommerperioden for alle de 27 stationer steget med ca. 13 cm, varierende i intervallet fra 1-59 cm. For vinterperioden er der sket en stigning på 10 af de 27 stationer. I gennemsnit er stigningen på 9 cm men varierende fra <1 cm til 27 cm.

Svendsen (2013) har vist, at dræn på nogen strækninger af udvalgte danske vandløb er stærkt påvirket af sedimentation (udløb nu under vandløbsbunden). Det kan der være en række årsager til, men disse drænsystemer vil derfor nu påvirkes stærkt af ændringer i vandstanden i recipienten. Desuden angives det i publikationen, at på mange stræk er afstanden fra bundkote til drænudløb under 30 cm. Det kan være tilstrækkeligt, men grødevækst og sedimentation i forbindelse med grødevækst i sommerperioden øger risikoen for, at vandstanden i perioder overstiger drænets udløb.

GRØDESKÆRING

Effekten af en grødeskæringsoperation er fundet i gennemsnit at sænke vandstanden med 16 cm, med en typisk margin på 6-40 cm i en begrænset periode (få uger, på grund af genvækst), eller i gennemsnit omkring 8 cm over 4 uger (Se "udredning om grødeskæring, 2016"). I gennemsnit betyder det en lidt mindsket hyppighed i denne periode. Er vandstanden over drænets udløb er et fald på 16 cm i grundvandsstand imidlertid ikke uden betydning for den potentielle rodzone og muligheden for kørsel på arealet. Et fald i vandstand på 40 cm vil have stor betydning for den potentielle rodzones størrelse.

Det fremgår af "udredning om grødeskæring, 2016", at effekten gennemgående er størst i vandløb med ringe fald, som vil være sammenfaldende med lavbundsområder og relativt flade og drænedede højbundsarealer.

FORSKELLE MELLEM JORDTYPER

Forskellige jordtyper har forskellige jordfysiske egenskaber, der påvirker deres afdræning, og de har forskellig følsomhed for dårlig afdræning. Eksempler på statiske vurderinger af dræningsforhold for forskellige jordtyper er vist i Appendix 2.

HUMUSJORDE

I forbindelse med lavbundsarealer er der stor fokus på humusjorde (JB11 (eller FK7 på farvekode-kort)). JB11 eller farvekode 7 refererer til jorder, der indeholder mere end 10 % humus i de øverste 30 cm af horisonten, og de forekommer primært i forbindelse med klassifikationen tørv, gytje eller sand på jordartskortet. Klassen indeholder en relativt bred gruppe, der strækker sig fra jorder med en humusrig A-horisont til tørvejorde.

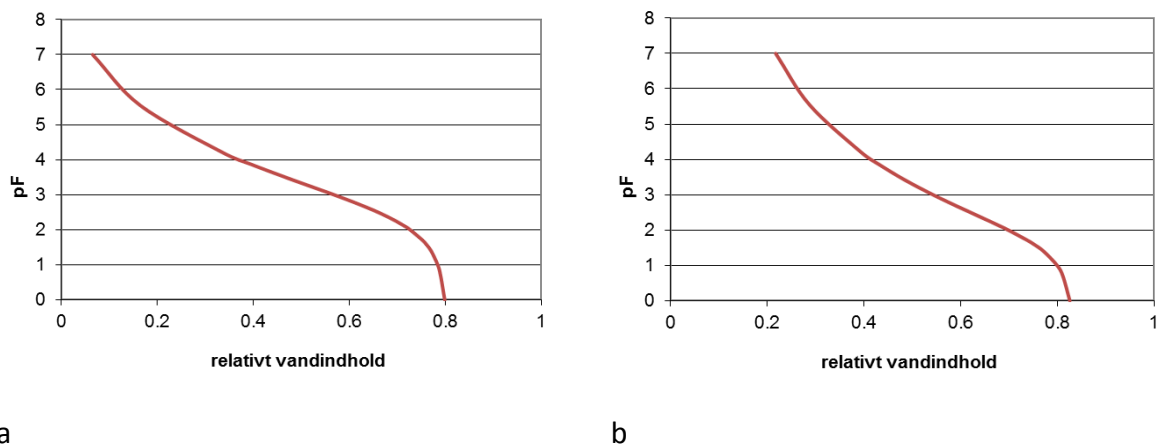
Dræning og dyrkning af humusjorde fører til mineralisering og tab af det organiske indhold, og dermed også en formindskelse af den organiske horisont. Arealerne, der findes inden for lavbundstemaet og som nu falder inden for andre klasser end farvekode 7, har haft et noget højere indhold af organisk stof i toppen af jordprofilet inden dræning og dyrkning påbegyndtes. Som tommelfingerregel forsvinder 1 cm af tørvelaget pr år under dyrkning, og der sker yderligere en kompaktering. Denne udvikling foregår over drænene, da jorderne jo stadig er vandmættede herunder, med mindre andre faktorer, som f.eks. hovedafvanding, har påvirket den generelle vandstand i området. Tykkelsen af jordprofilet over dræn (der normalt tilstræbes lagt i ca. 120 cm's dybde) vil være en indikation af, hvor stor betydning, mineralisering og kompaktering/konsolidering kan have haft på afdræningforholdene. På grund af mineraliseringen er den forventede levetid af dræn i tørvejord kun ca. 30 år.

De jorder, der kun har et højt organisk indhold tilbage i A-horisonten/topjorden, opfører sig afdræningsmæssigt som den mineraljord, underjorden tilhører. Dybe tørvejorde er væsentligt lettere end mineraljordene og indeholder betydeligt mere vand (hhv. Figur 3 og Figur 4), ved mætning ca. 80 volumen%.

Den mættede hydrauliske ledningsevne i naturlig tørvejord er meget høj, men den falder under dyrkning, samtidigt med at jordene bliver mere kompakte fordi tørven omsættes, og kan nærme sig niveauet for en leret underjord, med dårlig afdræning til følge. Traditionelt dyrkes ofte grøntsagsafgrøder (f.eks. gulerødder) eller kartofler med en begrænset roddybde (kartofler, max ca. 70 cm), hvilket ofte vil hænge sammen med at jordene har et højt grundvandsspejl i kraft af deres placering og en begrænset umættet zone som følge af den ovenfor beskrevne mineralisering og kompaktering. Det fremgår af retentionskurverne, at en mindre afstand

Boks 1: Retentionskurver

De forskellige jordtypers basale dræningsegenskaber beskrives ved hjælp af deres retentionskurve og deres hydrauliske ledningsevne. Retentionskurverne beskriver forholdet mellem det volumetriske vandindhold i jorden og trykket (målt i $pF = \log(\text{undertryk målt i cm vandsøjle})$). Jorden vil, under naturlige veldrænedede forhold, afdræne til ca. pF_2 , svarende til et undertryk på 100 cm vandsøjle, der også benævnes markkapacitet. Er jordvandet inden for den øverste meter i ligevægt med grundvandsspejlet, kan vandindholdet umiddelbart bestemmes vha. retentionskurven. Står grundvandet eksempelvis i 50 cm's dybde, vil ligevægtsvandindholdet i toppen svare til et tryk på ca. 1.7 pF -enheder ($pF = \log(50)$). Grundvandsstanden påvirker altså jordens vandindhold i hele den øverste meter, og modvirker udtørring af overfladelaget. Jordvandsindholdet ved mætning kan aflæses, hvor kurven skærer x-aksen.



FIGUR 3. REPRÆSENTATIVE RETENTIONS-KURVER FOR HISTOSOLS FRA QUIBEC, CANADA, PÅ BASIS AF 80 PRØVER FRA 20 CM' DYBDE OG 43 PRØVER FRA 35 CM'S DYBDE. RETENTIONS-KURVERNE REPRÆSENTERER A) PRØVER MED VOLUMENVÆGT STØRRE END 0.3 G/CM³ OG ORGANISKE PROFILER PÅ CA 1.5 M, OG B) PRØVER MED VOLUMENVÆGT MINDRE END 0.3 G/CM³ OG EN ORGANISK PROFIL PÅ CA 2 M. HALLEMA ET AL., 2015

mellem grundvand og overfladen betyder et større vandindhold og dermed en begrænsning i luftskiftet. Et forhøjet grundvandsspejl vil derfor give anledning til yderligere dyrkningsproblemer.

Ifølge Olesen (2007) er 165.000 ha af det udvidede lavbundsareal organogene jorde under landbrugsdrift. Nielsen et al. (2014), rapporterer imidlertid, på basis af et opdateret kort over organogene jorde, at kun 51.000 ha er klassificeret som "i omdrift", og 17.200 som græs. Forskellen i tallene indikerer at en del af ovenstående jorde må have skiftet status til mineraljord på grund af mineralisering af organisk materiale, men der kan også være tale om, at arealer er gået ud af omdrift, bl.a. på grund af forringede afdræningsforhold. Mere detaljerede data for de seneste år tyder på, at ca. 1200 ha/år forsvinder ud af dyrkning og at andelen af græsarealer er stigende (pers. com. S. Gyldenkerne).

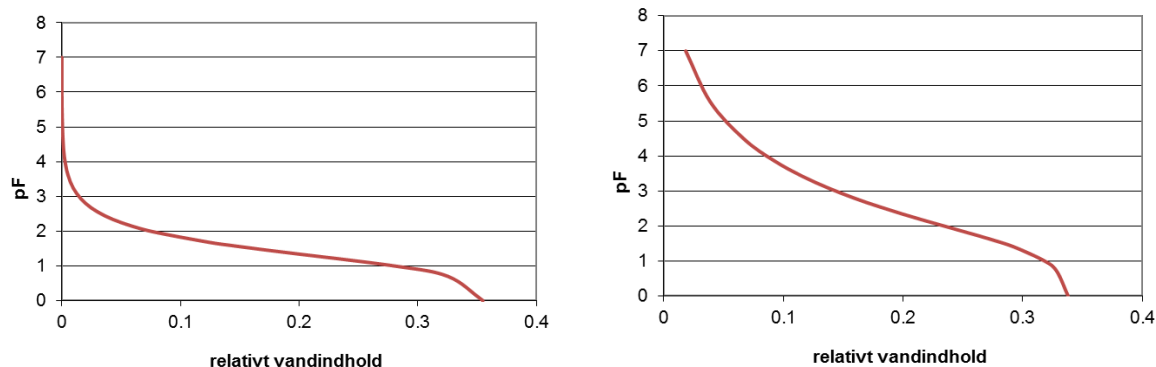
MINERALJORDE

I Figur 4 er vist nogle typiske retentionskurver for C-horisonter (100+ cm) klassificeret som henholdsvis "grovsandet" og "sandblandet ler". Vandindholdet ved mætning er i samme størrelsesorden, men vandindholdet ved markkapacitet er meget forskelligt, nemlig under 10 % for den grovsandede jord, mens det for den lerede C-horison svarer til ca 23 %. Det betyder, at der er betydeligt mindre plads til tilført nedbør i en lerjord, hvorfor grundvandsstanden hurtigt stiger, og tilsvarende falder ved udtørring. Den mættede hydrauliske ledningsevne i leren er desuden væsentligt mindre end i sand, så ekstra nedbør dræner langsommere gennem jorden. Alt i alt betyder det, at de årlige svingninger i grundvandsspejlets beliggenhed er væsentligt større i ler end i sand. Omvendt er luftskiftet langt bedre i den grovsandede jord end i den lerede.

Uanset jordtype, kan planterødder ikke tåle at være oversvømmede i længere perioder. Temperaturen er en væsentlig faktor her; om sommeren opbruges den tilgængelige ilt i løbet af et antal timer, mens det om vinteren kan tage dage (uger under meget kolde forhold). Grundvandsstanden begrænser derfor roddybden af de almindelige markafgrøder, både sommer og vinter, men svingninger i grundvandsstand vil være mest betydende på lerjorde.

På grovsandede jorde (JB1) begrænses rodudvikling imidlertid også af mekanisk modstand, og den naturlige effektive roddybde er kun omkring 50 cm, mens den er i størrelsesordenen 75 cm på finsandet jord (JB2). I "sandblandet ler" og mere lerede jorde observeres f.eks. hvederødder i 1.5 -2 m, hvis grundvandsstanden tillader det, mens den effektive roddybden "lerblandet sand" ligger et sted imellem (ca 85-100 cm).

Den relativt lille variation i grundvandsstand på sandjorde og den begrænsede mængde plantetilgængeligt vand (på grund af retentionskurven og den ringe roddybde), betyder, at det kan være en fordel at afvandringshøjden er nogenlunde konstant og lille, så planterne dermed har adgang til ekstra vand i sommer perioden. Derfor er den anbefalede drændybde på 0,7-0,9 m på disse jorde en balance mellem et ønske om gode ilttilgængelighed og næringsstofoptagelse i hele rodzonen samtidigt med at vandforsyningen opretholdes.



JB1_C

JB6_C

FIGUR 4. SAMMENHÆNG MELLEM VANDINDHOLD OG TRYK I UDVALGTE JORDTYPER OG HORISONTER. TIL VENSTRE ER VIST EN RETENTIONSKURVE FOR TYPISKE GROVSANDEDE HORISONTER, SVARENDE TIL EN JB1-TEKSTURKLASSE FRA 100 CM OG NED, MENS KURVEN TIL HØJRE REPRÆSENTERER JORDER MED 10-15% LER, OG ET SANDINDHOLD SVARENDE TIL EN JB6-TEKSTURKLASSE I TILSVARENDE DYBDE. KILDE: STYCZEN ET AL. (2004), APPENDIX A4, TABEL A41 B OG C.

I lerjorden betyder den hurtige opmætning af jorden ved kraftig nedbør, at et grundvandsspejl over anbefalet drændybde hurtigt fører til dårligt luftskifte og roddød. Høj grundvandsstand om sommeren er kun ønskelig her, hvis den kan styres f.eks. vha. pumpning.

Jorde i kategorien lerblandet sand (JB3-4) ligger igen et sted imellem de to andre typer. Især JB4-gruppen omfatter produktive jorde, hvor begrænsninger på rodzonens udbredelse ud over de tekstur-/struktur-betingede vil påvirke næringsstofoptagelsen negativt.

ANDRE ÅRSAGER TIL DÅRLIG AFDRÆNING

Dårlig afdræning af landbrugsjorde kan skyldes meget andet end begrænsninger på drænets funktionalitet. Jorde med lav hydraulisk ledningsevne som følge af leret tekstur og/eller dårlig struktur være dårligt drænede, også når drænsystemet er frit (tekstur/struktur-begrænset afdræning). Vådere jorde (på grund af dårlig dræning eller mere nedbør) er mere udsatte for jordpakning, som igen kan øge dræningsbehovet. Med anvendelsen af større og større maskiner i landbruget, er jordpakning i stor dybde en risikofaktor, og effekterne kan være meget langvarige eller endog permanente (Schjønning et al., 2009). Trærødder og rødder fra visse afgrøder kan stoppe dræn, og strømnings i drænene kan begrænses af okkerudfældning og sedimentation. Gamle drænsystemer kan "sætte sig" eller rørene kan med tiden beskadiges af tryk, sådan at kontinuiteten forstyrres (Kristiansen, 2012). Den sidste periode med stor dræningsaktivitet var omkring 1950 (Breuning-Madsen, 2010), hvilket vil sige, at mange drænsystemer nærmer sig en levetid på 70 år. Den forventede levealder af dræn i mineraljord estimeres til 60 år i Dansk Markdræningsguide (SEGES, 2015), mens andre kilder angiver 80-120 år (Kristiansen, 2012, baseret på Jensen, 1989 og Landbrugsministeriet, 1985).

Afdræningsbehov i forhold til landbrugsaktiviteter

Jordfugtigheden har betydning for, hvornår det er muligt at køre på marken (jordens "bæreevne"). Er jorden for våd, sker der skader i jordstrukturen (jordpakning), når der køres med tunge maskiner. Mens skaderne i jordens øverste lag kan mindskes gennem jordbehandling, så er de dybere skader som nævnt langvarige eller permanente, og påvirker afdræning, rodvækst og luftskifte i jorden negativt (Schjønning et al. 2009). Jordfugtighedsforholdene er naturligt påvirkede både af vejr, jordtype og afgrødevalg, men forhøjet grundvand er en yderligere risikofaktor. Risikoen for pakning er generelt størst ved markoperationer, der kombinerer høst og transport, fordi der typisk anvendes meget tungt maskineri. Gylleudbringning på forårsvåd jord repræsenterer en særlig risiko. Omvendt betyder jordpakning at jordenes dræningsbehov bliver endnu større.

Derudover er jordens bearbejdningsegenskaber, og dermed kvaliteten af jordbearbejdningen, også snævert relateret til jordens vandindhold. Lerjorde er mere sensitive end sandjorde. For at bearbejde lerjord er det nødvendigt at overfladelaget tørrer til under markkapacitet², og optimale bearbejdningsegenskaber opnås først ved yderligere udtørring. Denne udtørring vanskeliggøres eller umuliggøres, hvis overfladefugtigheden er påvirket af et højtliggende grundvandsspejl, i praksis hvis afvandingsdybden er lavere end 100 cm.

Typiske perioder for jordbehandling er forårsplojning (vårafgrøder) omkring 1. marts og harvning/såning i marts/april, eller efterårsplojning i august/september for vinterafgrøder eller i november før vårafgrøder på lerjord. Såning af forårskorn bør foregå så snart jorden er tjenlig og temperaturen passende efter 1. marts. Såning af efterafgrøder eller vinterraps foregår i august og typisk i september (oktober) for vinterkorn.

Gødningsudbringning finder typisk sted ved vækstperiodens start i marts-april, men ca. 1. maj for majs og flere gange i løbet af sommeren for græs. I forhold til jordfugtighed og pakningsrisiko er udbringning af gylle om foråret mest kritisk, da det kræver tungt maskineri.

Høst foregår typisk fra midt i til sidst i august og kræver også tungt maskineri. Dog kan majs, roer, kartofler og græs høstes senere. Høsten af majs og sukkerroer i oktober måned udgør en særlig pakningsrisiko, da vandindholdet i jorden på dette tidspunkt normalt er steget og dræningssæsonen startet.

Da grøden kan påvirke vandstanden i vandløbet fra april til november, er de samspilsproblemer, der kan opstå primært relateret til 1) midlertidig høj vandstand og dårligt luftskifte i rodzonen i planternes vækstperiode, 2) høst, jordbehandling og såningsaktiviteter i sensommeren og 3) i nogle tilfælde gødningsudbringning.

Hvis grøderester giver anledning til høj vandstand sidst på året eller hvis vandløbsbunden stadig er påvirket af grøderester og sedimentation i vinterperioden og det tidlige forår, kan langsom afdræning på grund af høj vandstand i en nærliggende å også umuliggøre eller forsinke jordbehandling, gylleudbringning og såning i marts/april, eller efterårsplojning i august/september for vinterafgrøder eller i november før vårafgrøder på lerjord

Effekten af høj nedbør på vandindholdet i jorden og afstrømningen til vandløb afhænger af vejret i den foregående periode, og en vurdering af effekten på landbrugsarealerne kræver hydrologisk modellering, der tager både historikken og ekstremhændelsen i betragtning. Et eksempel er vist i kap. 0.

² jordens vandindhold efter vandmætning, når nedsivning er nær ophørt og grundvand ikke influerer (Aslyng, 1976)

ÆKSEMPLIFICERING AF SAMMENHÆNGE MELLEM VANDSTANDEN I VANDLØB OG AFVANDING EN MARK (TOKKERUP).

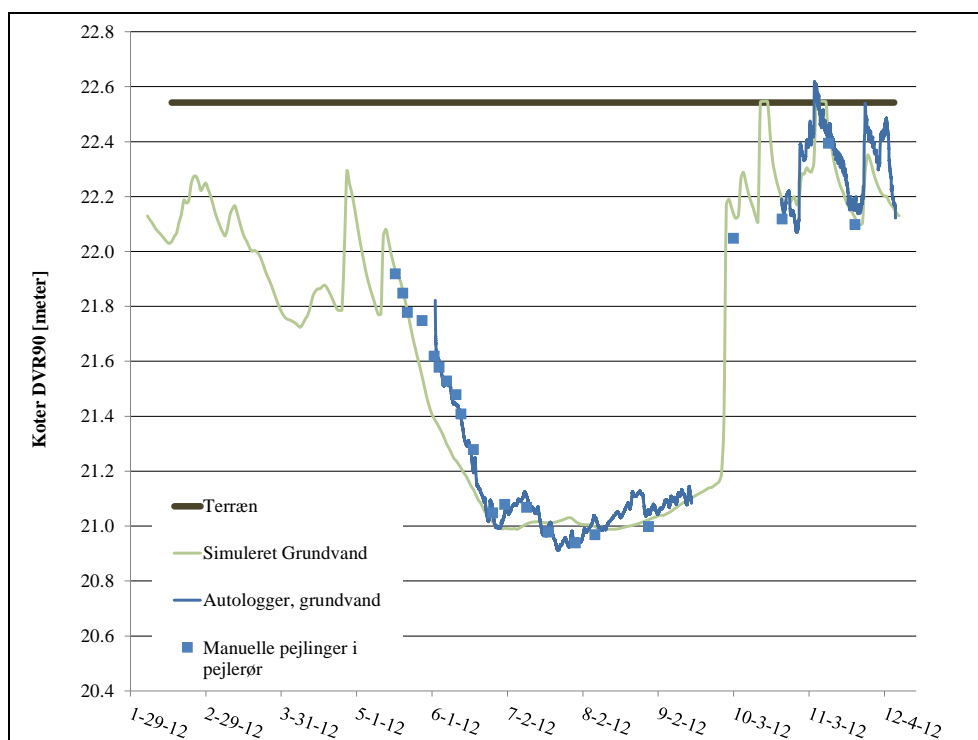
Et areal ved Tokkerup har over de seneste år været anvendt til studier af dårlige afdræningsforhold og disses indflydelse på landbrugsproduktion. Undersøgelserne er beskrevet i Hansen og Jensen (2013), Jensen (2014) og fortsætter i igangværende PhD- og MSc-projekter. Arealet er næsten fladt, og dræningsforholdene varierer hen over marken, med de bedst drænedes arealer tættest på åen og i en trekant ind i marken, hvor spidsen følger hoveddrænet, og de dårligst drænedes arealer længst væk fra åen. Drænudløbet er neddykket i en betydelig del af vinteren. Figur 5 viser en forårssituation, hvor jorden er afdrænet i det meste af marken, men de mørke farver viser, at den opstrøms del og nogle af arealerne i siden af marken stadig er våde. Drænenes placering kan ses som sildebensmønster, hvor der er tørt over drænet og vådere mellem drænene. Drænene ligger højere i den opstrøms del af marken og væk fra hoveddrænet fordi de er installeret med en hældning mod recipienten, men trykket under drænene opretholdes af de generelle strømningsforhold i moræneleren, ser Appendix 2. Hoveddrænets hældning er lidt mindre end 2 ‰.

Der er etableret syv forsøgsplot, der afspejler forskellige afdræningsforhold i marken, og modellering af tre af disse ved hjælp af Daisy-modellen (Hansen et al., 1991, Abrahamsen og Hansen, 2000 og Hansen et al., 2012) er beskrevet i ovenstående kilder. De modellerede plots er plot 2, der ligger ca. 50 m fra vandløbet, plot 4, der ligger ca. midt på marken og plot 6, som ligger i den opstrøms del af marken, ca. 300 m fra vandløbet. Plot 6 er under våde forhold påvirket af de generelle trykforhold beskrevet i Appendix 2, men den påvirkes ikke direkte af vand fra åen. Figur 6 viser simuleret og målt grundvandsstand på plot 6 i 2012 (Hansen og Jensen, 2013). Drænet ligger i ca. 60 cm's dybde, men det ses, at grundvandsstanden i plottet overstiger drændybden det meste af vinteren (jf. Figur 2.6b i Appendix 2). I maj måned står grundvandsstanden stadig højt i dette år, men i sommerperioden falder grundvandsspejlet på grund af negativ nettonedbør. Figuren viser, at det er muligt at beskrive grundvandsdynamikken i marken med god præcision.

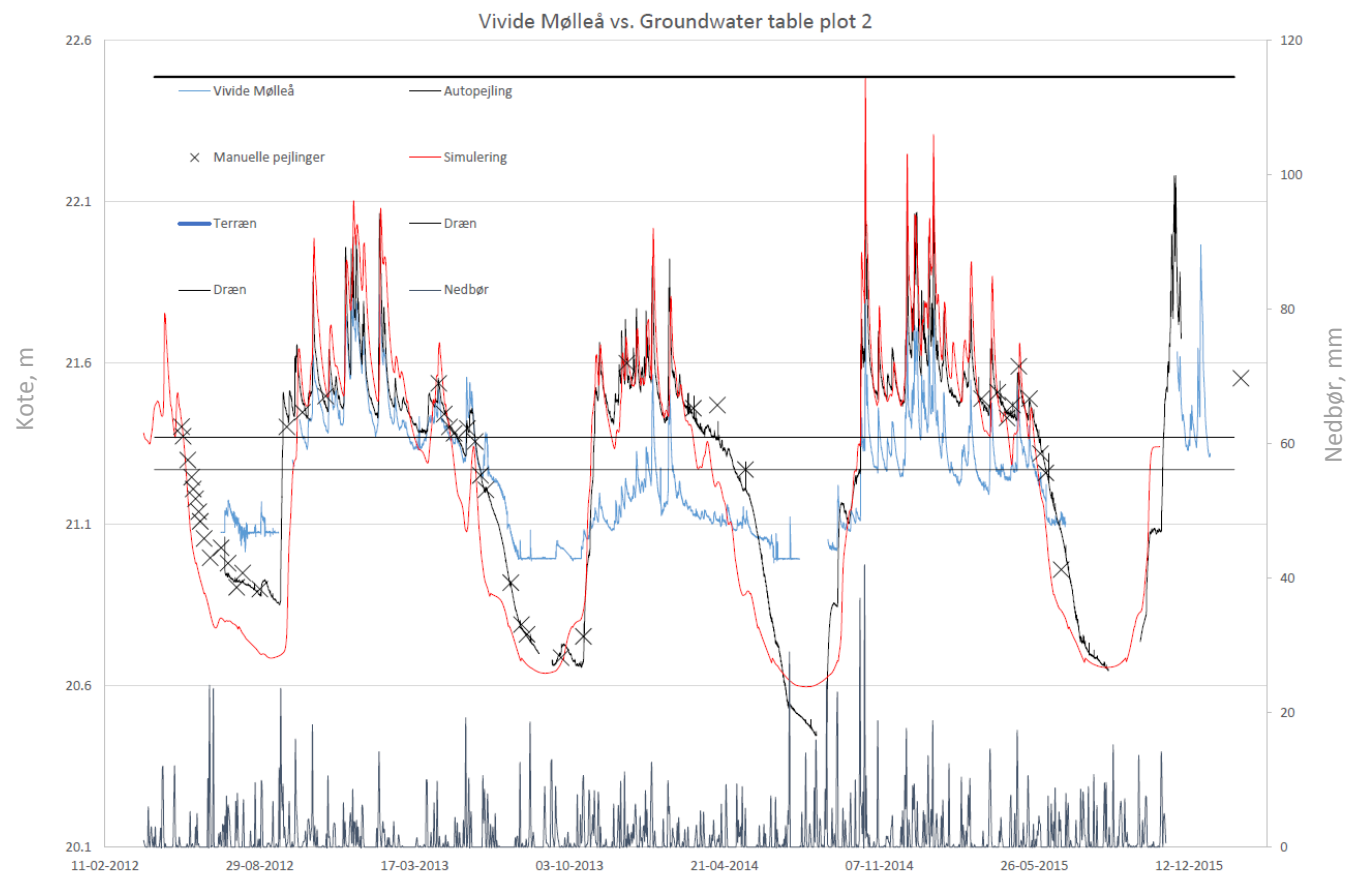
Plot 2 (Figur 7), der ligger ca. 50 m fra vandløbet, er derimod stærkt påvirket af vandstanden i åen. I vinteren 2012-2013 står vandstanden i åen højere end hoveddrænets udløbskote fra 26. september til 11. juli, og over drænkoten i plottet til ca. 20. juni. Der er derfor en periode i foråret, hvor tilstedeværelse af grøde kan medvirke til at holde vandstanden over drænkoten og medvirke til at forsinke afdræningen. I sommeren 2013 er der sket en oprensning af vandløbet, og vandstanden i åen holder sig generelt under drænkoten i plot 2, men oversvømmer stadig drænudløbet fra 12. december til 24. februar. I vinteren 2014-2015 er vandstanden steget og drænets udløbskote er oversvømmet fra 13. oktober til 7. juni. I de tre år, har der ikke været større nedbørshændelser i sommerperioden.



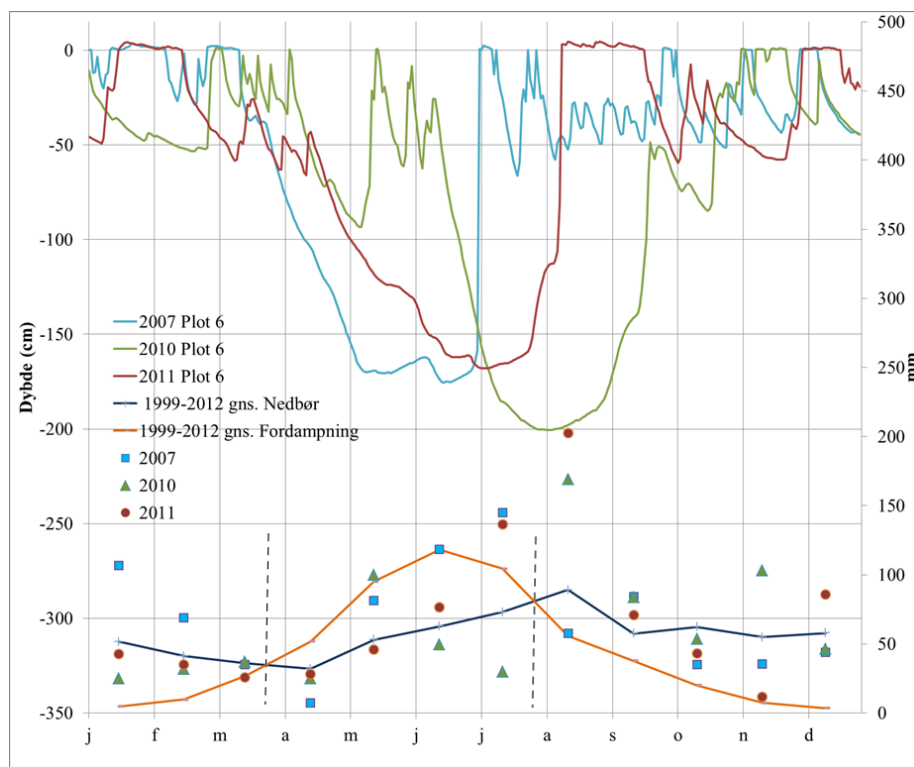
FIGUR 5. FORÅRSSITUATION I FORSØGSMARK VED TOKKERUP MED LILLE TERRÆNHÆLDNING. BILLEDET ILLUSTRERER, AT DE VÅDESTE OMRÅDER I MARKEN FINDES LÆNGST VÆK FRA RECIPIENTEN (VIVEDE MØLLEÅ) OG MELLEM DRÆNENE. DRÆNENE I DETTE OMRÅDE LIGGER TÆTTERE PÅ OVERFLADEN FOR AT OPNÅ DET NØDVENDIGE FALD, OG GRUNDVANDET UNDER I DENNE DEL AF MARKEN STÅR STADIG OVER DRÆNNIVEAU. [LUFTFOTO AF UKENDT OPRINDELSE, PRÆSENTERET I HANSEN OG JENSEN (2013)].



FIGUR 6. MÅLINGER OG SIMULERING AF GRUNDVANDSSTANDEN I PLOT 6 I TOKKERUPFORSØGET. DATA OG SIMULERINGER ER BESKREVET I HANSEN OG JENSEN (2013), OG FIGUREN ER STILLET TIL RÅDIGHED AF K.J.S. JENSEN.



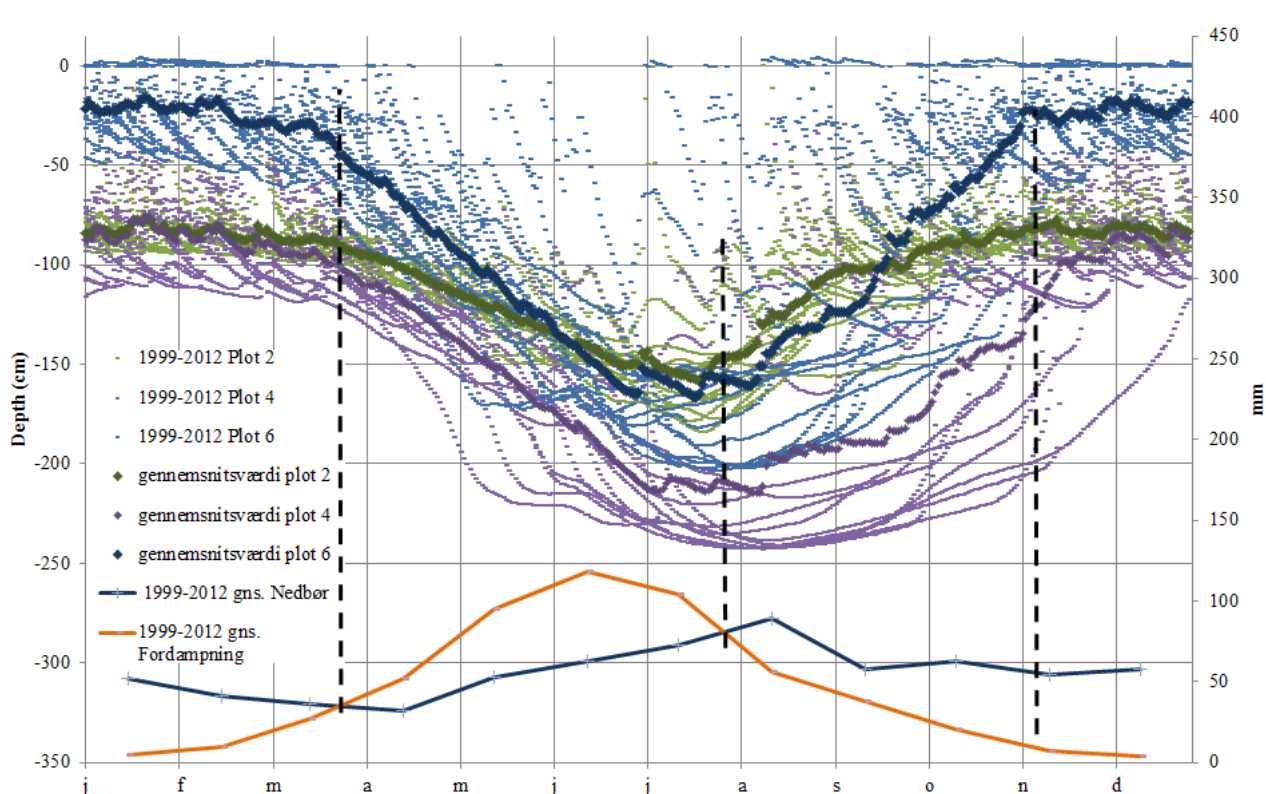
FIGUR 7. MÅLT OG SIMULERET GRUNDVANDSSTAND PÅ PLOT 2, VANDSTAND I VIVEDE MØLLEÅ OG PLACERING AF DRÆNET I PLOT 2. NEDBØREN ER VIST NEDERST I FIGUREN. FIGUREN ER STILLET TIL RÅDIGHED AF K.G. GYLDENGREN.



FIGUR 8. BEREGNET GRUNDVANDSSTAND I ET FORSØGSPLØT (TOKKERUP, PLOT 6) I UDVALGTE ÅR (HANSEN OG JENSEN, 2013). BEREGNINGEN ER FORETAGET FOR 1999-2012. NEDERST I FIGUREN ER VIST DEN GENNEMSNITLIGE NEDBØR OG FORDAMPNING FOR PERIODEN. MÅNEDSNEDBØREN FOR 2007, 2010 OG 2011 ANGIVET MED SIGNATURENE VIST I FIGUREN, OG KAN AFLÆSES PÅ HØJRE AKSE. DE ØVERSTE KURVER VISER GRUNDVANDETS BELIGGENHED I FORHOLD TIL TERRÆN I DE SAMME TRE ÅR. SELV OM MAN I DE FLESTE ÅR VIL FORVENTE EN UDTØRRING AF JORDPROFILET I PERIODEN MED NEGATIV NEDBØR, SÅ HAR DER I MAJ-JUNI 2003, I JULI-AUGUST 2007 OG I AUGUST-SEPTEMBER 2011 VÆRET NEDBØRSHÆNDELSER, DER HAR RESULTET I OPFYLDNING AF PROFILET OG HØJ GRUNDVANDSSTAND OG DERMED BEHOV FOR AFDRÆNING. FIGUREN: K.J.S. JENSEN.

Imidlertid varierer nedbørsforholdene betydeligt fra år til år, og Hansen og Jensen (2013) har derfor ekstrapoleret modelberegningerne fra plot 6 til perioden 1999-2012 ved hjælp af klimadata.

Figur 8 viser udvalgte resultater fra disse beregninger. Nederst i figuren ses den gennemsnitlige nedbør og fordampning i hele beregningsperioden. De lodrette streger indikerer, hvor nettonedbøren skifter fra at være positiv til negativ og tilbage igen. I perioden mellem stregerne vil man forvente en udtørring af jorden, som det også sker i 2012 (Figur 6). Imidlertid er det ikke altid tilfældet, og i det viste eksempel har det specielt været i maj-juni 2003, i juli-august 2007 og i august-september 2011, at høj nedbør i sommerperioden har resulteret i opfyldning af profilet og høj grundvandsstand. I disse perioder vil vandstanden i åen i forhold til dræneløbet have indflydelse på, hvor hurtigt arealet dræner af, og her vil grøde kunne spille en rolle.



FIGUR 9. GENNEMSNITLIG NEDBØR OG FORDAMPNING I PERIODEN 1999-2012 I FORSØG I TOKKERUP, PLOTTET SAMMEN MED GRUNDVANDSSTANDE I 3 PLOTS I SAMME PERIODE. DE TRE LODRETTE STREGER INDIKERER 1) OPTØRRING AF JORDEN OM FORÅRET, NÅR FORDAMPNINGEN OVERSTIGER NEDBØREN, 2) TIDSPUNKTET, HVOR VANDINDHOLDET I JORDEN STIGER IGEN, FORDI NEDBØREN OVERSTIGER FORDAMPNINGEN, OG 3) VINTERSITUATIONEN, HVOR DER NOGENLUNDE OPNÅS ET KONSTANT GRUNDVANDSSPEJL, DER REPRÆSENTERER BALANCEN MELLEML NEDBØR OG AFRÆNING. FIGUR STILLET TIL RÅDIGHED AF K.J. JENSEN.

Der eksisterer kun vandstandsmålinger fra vandløbet ved marken fra 2012 og frem, så beregningerne for plot 2 kan ikke ekstrapoleres med de samme forudsætninger som er anvendt i beregningerne i Figur 7. For at ekstrapolere til en længere tidsserie, er der indlagt nogle gennemsnitlige værdier for vandstanden sommer og vinter. For plot 2 betyder det, at samspillet mellem høj nedbør og høj vandstand i åen er undervurderet. Figur 9 er vist vandstanden beregnet med de forudsætninger for plot 2, plot 4 og plot 6 i alle årene 1999-2012. Den gennemsnitlige grundvandsstand om sommeren er på niveau med eller lidt højere i plot 2 end i plot 6, og grundvandsstanden stiger i gennemsnit hurtigere i august-september i plot 2 end i plot 6, på grund af vandløbets indflydelse. Beregningen for plot 2 viser, at der er få hændelser i juni og juli, der har haft betydelig indflydelse på vandindholdet i rodzonen i den nedstrøms del af marken, men at antallet af hændelser, hvor grundvandsstanden stiger til mindre end en meter fra terræn stiger i august for alle tre plot.

Der er betydelig udbytteforskel som funktion af grundvandsstanden i marken (op til 25 % mellem den bedst og dårligst drænede parcel), men da målingerne indtil videre er foregået i år uden ekstremhændelser i sommerperioden, kan udbyttenedgangen på nuværende tidspunkt primært knyttes til vintervandstanden og afdræningsforholdene i foråret og deraf afledte effekter på iltforsyning, temperatur, denitrifikation og mulighed for færdsel. Igangværende forskning viser, at roddybden i de forskellige parceller er begrænset af grundvandsniveauet.

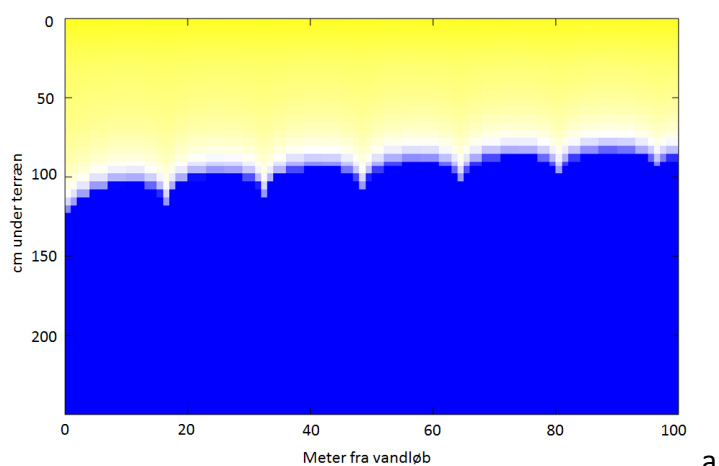
For at forbedre forståelsen af de dynamiske forhold under en afdræningssituation i en mark af denne type, er opstillet en to-dimensional-model, der beskriver principperne i Tokkerupmarken. Modellen beskriver et tværsnit fra vandløbet og ind i marken. Oplandet er forkortet til 100 m, og der strømmer ikke vand ind i modellen opstrøms fra. Tværsnittet

er placeret parallelt med hoveddrænet, sådan at sidedrænene skærer igennem tværsnittet. Sidedrænene er indlagt med 16 m's afstand. Den lodrette afstand mellem sidedrænene er 5 cm, svarende til, at den hovedledning, sidedrænene ville være koblet til, stiger 5 cm pr 16 m, svarende til et fald på 0,31 %. Tværsnittet svarer i princippet til at lægge en linje hen over sildebenene i Figur 5, parallelt med hoveddrænet. Der er anvendt de samme jordparametre som i modelleringen af plot 6 ovenfor. Vandstanden i åen er målte værdier fra Tokkerup, men vandstanden er i de forskellige simuleringer rykket i forhold til terræn (-20 cm, -40 cm, 0, +20 cm), med det formål at belyse hvornår vandstanden i vandløbet er af væsentlig betydning for afdræningen. Beregningen er udført for 2012-2014.

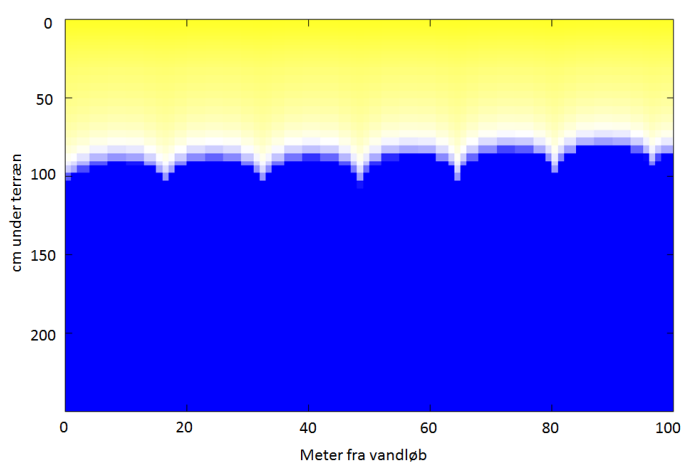
Resultaterne indikerer, at så længe drænudløbet er frilagt, er afdræningsforholdene over drænene domineret af drænenes placering. Fra jorden er afdrænet i 2013 fremad, hvor vandstanden generelt er lavere, er forskellen mellem simuleringer med den eksisterende vandstand og sænket vandstand begrænset. Når drænudløbet ligger lavere end vandstanden i vandløbet, påvirkes vandindholdet over drænene mere. Figur 10 viser et udtræk af resultater af to simuleringer på samme dato (1.3 2012), hvor jorden har været mættet op og er under afdræning. Den midterste figur (b) er beregnet med den reelle (dynamiske) vandstand i Vivede Mølleå ved drænudløbet, mens vandstanden er sænket 20 cm i den øverste figur (a). "Dykkene" i grundvandsstand viser drænenes placering i modellen. I begge tilfælde vises grundvandsstanden med blå farve. Grundvandsstanden er primært påvirket af højere vandstand i åen tættest på åen (til venstre). Forskellen i vandindhold i den umættede zone mellem de to simuleringer, er vist i den nederste figur (c). Den blå farve angiver at simuleringen med høj vandstand i åen har resulteret i højere vandindhold i jorden, og stærkere blå indikerer større forskel. Vandindholdet i den umættede zone (nederste figur) er også primært påvirket tættest på åen, men der er en påvirkning i hele tværsnittet. Påvirkningen lige over de opstrøms dræn er mindst (mod højre), fordi afdræningen her primært er afhængig af de ikke-oversvømmede dræns placering. Mellem drænene er der også i den opstrøms ende et lidt større vandindhold på grund af et øget grundvandstryk. I beregningen ses en kraftig overgang ved ca. 30 cm's dybde, der skyldes en ændring i tekstur og volumenvægt mellem toplaget (A-horisonten) og de underliggende jordlag (B-horisonten). Der er ikke taget hensyn i beregningerne til, at drænsystemets kapacitet skulle begrænse afstrømningen (hverken som funktion den hydraulisk modstands sammenhæng med rørenes fyldningsgrad eller en eventuel sedimentation i rørene som følge af neddykning).

Konklusionerne fra den to-dimensionale modelanalyse er anvendt som begrundelse for at vælge oversvømmelse af drænudløbet som kriterie for påvirkning af et drænsystem.

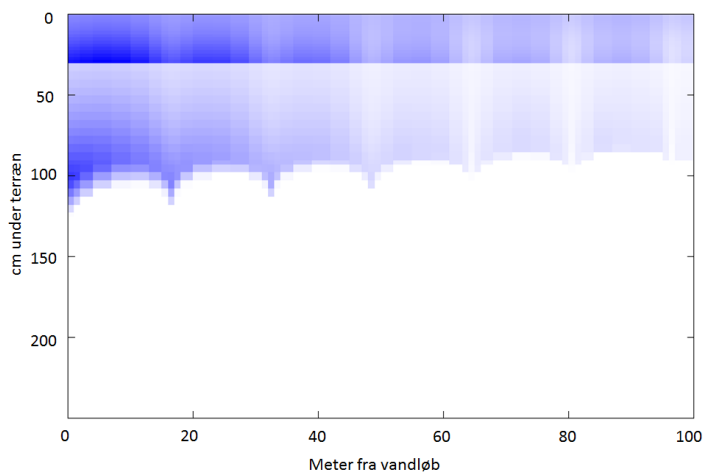
Figur 10 viser også, at grundvandsstanden i de to ender af marken bliver mere ens, når drænene dykkes. Jensen (2014) har undersøgt (ved hjælp af 1-D-modellering) hvor meget længere det tager om foråret at opnå samme vandpotentiale i de øverste 5 cm af jorden i plot 6 i forhold til de mere veldrænede dele af marken tæt på åen. For årene 2008-2012 er det beregnet til i gennemsnit 7-8 dage. For en sommerhændelse forventes normalt højere temperaturer og dermed en hurtigere udtørring. I de ovennævnte studier er også beregnet denitrifikation, og denne er i gennemsnit fundet at være ca. 8 kg større i plot 6 i forhold til de mere veldrænede dele af marken. Denne forskel kan være lidt undervurderet, fordi modellen ikke i tilstrækkeligt omfang begrænser plantevæksten som følge af de våde forhold.



a



b



c

FIGUR 10. SIMULERING AF VANDINDHOLDET I ET JORDPROFIL-TRANSEKT FRA ÅEN OG 100 M IND I MARKEN 1. MARTS 2012, BEREGNET MED DAISY-2D. DEN MIDTERSTE FIGUR (B) ER BEREGNET MED DEN REELLE (DYNAMISKE) VANDSTAND I VIVEDE MØLLEÅ VED DRÆNUDLØBET, MENS VANDSTANDEN ER SÆNKET 20 CM I DEN ØVERSTE FIGUR (A) . I BEGGE TILFÆLDE VISES GRUNDVANDSSTANDEN MED BLÅ FARVE. FORSKELLEN I VANDINDHOLD MELLEM DEN MIDTERSTE FIGUR, HVOR DRÆNET ER OVERSVØMMET OG DEN ØVERSTE FIGUR, HVOR DRÆNET ER FRILAGT, ER VIST I DEN NEDERSTE FIGUR. KRAFTIGERE BLÅ FARVER ANGIVER STØRRE FORSKEL I VANDINDHOLD MELLEM DE TO SIMULERINGER.

Der er en række udfordringer i modellering af de detaljerede forhold omkring dårligt dræned jorde og dræningens indflydelse på plantevækst. En god modellering af sammenhængen mellem nedbør, grundvandsstand og afstrømning i et opland opnås bedst ved en 3-D-modellering, for eksempel med en model som MIKE SHE (Abbott et al., 1986 a, b). Alle typer hydrologisk modellering stiller krav til randbetingelser, og man forsøger normalt at lade en sådan modelopstilling følge lokale vandskel, hvilket også betyder, at modelopstillingen dækker et langt større areal end en mark. Plantevækstfaktorer gives som input (beregnes ikke), og afdræning fra marker beskrives med en simpel lineær reservoir-model, hvilket betyder, at der normalt ikke kan skelnes mellem forhold over og mellem dræn, og at dræn er defineret ved en dybde, men ikke deres placering. Størrelsen på beregningscellerne kan vælges frit, men da det modellerede areal normalt er større end i de ovenstående beregninger, er de anvendte beregningsceller det normalt også, med en deraf følgende grovere beskrivelse af lokale variationer. Der eksisterer også modeller eller metoder, hvor beregningsnettet kan gøres mere detaljeret i udvalgte områder af særlig interesse, der kan afhjælpe sidstnævnte problem. Modellen tager hensyn til topografi, men beskriver ikke kulstof- og kvælstofdynamik.

Daisy-modellen i sin en-dimensionale-form beskriver den vertikale fordeling af vand, plantevækst, kulstof- og kvælstofdynamik på et areal (fra m² til markskala), men den er afhængig af, at de lokale randbetingelser kan specificeres eller på anden vis justeres på plads på baggrund af målinger. Det betyder, at ændringer af grundvandsstand eller ændringer i å-vandstand som følge af f.eks. klimaforandringer eller lignende ikke kan genereres af modellen, men må benyttes som randbetingelse. Modellen beskriver afdræning ved hjælp af Hooghoudt's ligning hvilket giver mulighed for en mere detaljeret beskrivelse af forhold over og mellem dræn og nu også i forhold til vandstanden i en nærliggende å. Modellen er udviklet til beskrivelse af veldræned landbrugsarealer, og tilpasning af plantevækstfaktorer til vådere forhold er en del af igangværende projekter. På nuværende tidspunkt "vokser planterne for godt" i modellen under de våde forhold. Det er imidlertid uden betydning for de konklusioner, der er draget på baggrund af modellering ovenfor. Det spiller en rolle for vurderinger af udbytteeffekter, udvaskning og denitrifikation, og hvis modelleringsresultater er refereret andetsteds i teksten, er dette forhold kommenteret.

Den todimensionale modellering ovenfor tager både hensyn til dræn på samme måde som i den endimensionale Daisy 1-D, og til vandstanden i vandløbet, og beskriver derfor vandbevægelse til dybere grundvand, til dræn og til å, under forudsætning af vandbevægelserne kan beskrives som foregående vinkelret på åen. Den anvendte modelopsætning er begrænset til 100 m, med en antagelse om at vandskellet ligger 100 m fra åen. Det er valgt, fordi den meget fine opdeling i beregningsceller betyder, at beregninger tager lang tid. Det påvirker ikke den generelle konklusion om, at den største påvirkning af en hævet vandstand i åen finder sted tættest på åen, men begrænsningen af oplandet til 100 m betyder, at grundvandsstrømningen er mindre end i forsøgsmarken. Daisy-2D-modellen er indtil videre kun udviklet til at beskrive en flad mark (kan ikke beskrive en kuperet overflade), men er også kun anvendt til beskrivelse af Tokkerup-arealet.

De forskellige modellers forcer og begrænsninger betyder, at man med fordel kan anvende flere modeltyper til at belyse forskellige aspekter af dette problemkompleks. En 3-D-model kan anvendes til at generere randbetingelser for mere detaljerede lokale beregninger.

EFFEKTER AF RINGE AFVANDING PÅ LANDBRUGSDRIFT

Den omfattende dræning, der er udført i Danmark over de sidste mere end 150 år betyder, at der siden begyndelsen af 1970'erne ikke har været fokus på landbrugsmæssige effekter af dårlig dræning. Den forskning, der er udført, er derfor overvejende udført før 1975, har mere fokus på landbrugs- end miljøaspekter og afspejler de afgrødevalg og landbrugsmetoder, der var gængse på det pågældende tidspunkt. Kun kilderne refereret i 0 omfatter ny dansk forskning på dette område.

DENITRIFIKATION OG LATTEGASPRODUKTION

Heterotrof denitrifikation (omdannelse af nitrat til N_2 og N_2O) i jordens umættede zone foregår fortrinsvis i topjorden (A-horisonten), og processen kræver, ud over nitrat, tilstedeværelse af kulstof, mikroorganismer og iltbegrænsede forhold. Når iltten begrænses på grund af forhøjet vandindhold og respiration, dannes først lattergas, men hvis ilttilgængeligheden formindskes yderligere omdannes nitraten til frit kvælstof (N_2). Grænserne mellem de forskellige faser er jordtypeafhængige, men retningsgivende værdier for vandindhold kunne være i størrelsesorden 60 % og 80 % (Davidson et al., 2000). Med et totalt porevolumen på godt 40 % (realistisk for en mineralsk A-horisont), svarer det til vandindhold på henholdsvis 24 % og 32 %. Som følge af forskelle i retentionsegenskaber og ledningsevner, opnås de høje vandindhold sjældnere i sandjorde end i lerjorde. Høj grundvandsstand vil øge frekvensen af vandmættede forhold og dermed risikoen for denitrifikation med et givet vejr.

Den heterotrofe denitrifikation stiger, hvis jordens øverste horisont er våd i perioder, hvor temperaturen er over ca. 5° C, da der foregår mineralisering af organisk stof og nitrifikation. Denitrifikation stiger med mængden af tilgængelig nitrat, hvorfor forholdene i perioden efter gødningsudbringning (især gylleudbringning), og efter høst, hvor afgrøderester mineraliseres, er særligt kritiske. Set i forhold til grødens vækstperiode, er det altså primært gødningsudbringninger til sent såede afgrøder og græs, der tidsmæssigt kan falde sammen med forhøjet vandstand som følge af grøde. Efter høst, hvor der sker mineralisering af efterladte planterester, vil risikoen for denitrifikation også være forhøjet.

Mange skift mellem normale og meget våde forhold i tilknytning til højt nitratinhold i jorden giver anledning til særlig høj lattergasdannelse. Da lattergas er en klimagas, der er ca. 300 gange så kraftig som CO_2 , er tab af lattergas uønsket, også fra et klimaperspektiv. Som beskrevet i kap. 0, viste beregninger en gennemsnitlig (over 5 år) og måske undervurderet forskel i denitrifikation på en JB6-jord på ca. 8 kg mellem et dårligt og et bedre drænet plot, men dette er ikke opdelt i lattergas og N_2 . Estimaterne er på årsbasis, og tallet vil ikke være repræsentativt for andre jordtyper og vådere regioner i Danmark.

Der er påvist en klar sammenhæng mellem denitrifikation og udbyttetab på dårligt drænende jorde (f.eks. Aslyng, 1980), og udbyttetabet kan disse tilfælde modvirkes ved ekstra tildeling af kvælstof. De beskrevne forsøg er imidlertid udført enten med fast grundvandsspejl eller på årsbasis, hvorfor det er vanskeligt at udskille en effekt af forskellen i denitrifikation i grødevækstperioden som følge af forskelle i afdræning.

Elsgaard og Kandel (2016) har fundet et markant produktion af lattergas ved dyrkning af kartoffel på en organisk jord i oktober-november og juni, men ikke en tilsvarende effekt ved dyrkning af havre, men det er ikke angivet, om toppen i juni hænger sammen med gødningsudbringning, og afdræningstilstanden er ikke beskrevet.

Audet et al. (2013) finder ikke nogen stigning af lattergasudviklingen ved omlægning af sandede og organiske jorder fra dyrkning til våde græsarealer. De konkluderede, at lattergas-fluxene var meget variable i tid og rum og synes at være relateret til kvælstofindholdet i topjorden. Områderne synes ikke at have modtaget gødning i perioden. Udledningen faldt i gennemsnit lidt ved omlægningen af grundvandet fra hhv. -40 til +20 cm, -70 til -40 cm og -80 til –

40 cm, hvilket stemmer overens med, at denitrifikationsprocessen i vådere jorde i højere grad løber til ende, men de meget våde forhold er ikke repræsentative for de fleste dyrkede jorde.

JORDTEMPERATUR

Jordtemperaturen er af betydning for plantevækst om foråret. Det tager længere tid at opvarme en våd jord end en veldrænet jord. Denne effekt er vigtigst om foråret og vil derfor primært kunne påvirkes af den generelle afdræningstilstand. Den lavere jordtemperatur om foråret forsinker væksten og påvirker udbytterne negativt og er en faktor i den samlede effekt af dårlig dræning på udbyttet, men er mindre relevant i forhold til grødeskæring som sådant.

RODUDVIKLING – OG RODDYBDE PÅ FORSKELLIGE AFGRØDER

Planterødder på almindelige landbrugsafgrøder i Danmark kan ikke tåle at være oversvømmede i længere perioder. Som nævnt tidligere er skadeeffekten temperaturafhængig, og om sommeren kan skaden opstå allerede efter et antal timer. Der eksisterer ikke detaljeret viden om sammenhængen mellem varighed af høj grundvandsstand på forskellige tidspunkter i vækstsæsonen, roddød, nydannelse af rødder og udbyttetab. En begrænset rodmasse betyder dog et mindre jordvolumen at optage næringsstoffer fra og større risiko for vandstress, hvis den våde periode efterfølges af en tør. Igangværende studier viser en klar sammenhæng mellem roddybde og grundvandsstand i vinterperioden, men studieperioden har endnu ikke indeholdt hændelser, hvor rødder er blevet oversvømmet i sommerperioden.

Det er beskrevet tidligere, at roddybderne kan begrænses af jordens tekstur, men der er også forskel på forskellige afgrøders potentielle roddybde. En række rodstudier er opsummeret af Thorup-Kristensen (2006): Vinterhvede kan udvikle rødder til 1.5-2 m's dybde, mens sukkerroer og vinterraps (Thorup-Kristensen, 2001 og Kristensen and Thorup-Kristensen, 2004b) kan have rødder, der går dybere end 2 m. En efterafgrøde som olieræddike er fundet at kunne udvikle rødder til ca. 2 m's dybde, hvis afdræningstilstanden tillader det, mens forårssået korn har et potentiale på 1-1.2 m. For afgrøder som græs, ært og kartoffel, ligger potentialet nærmere 70 cm, for rajgræs dog 75-100 cm (Thorup-Kristensen, 2001). Grøntsagsafgrøder varierer betydeligt afhængigt af art (fra 25-250 cm, Kristensen and Thorup-Kristensen, 2004a, b), men værdierne ligger typisk i intervallet 50-120 cm.

Generelt ønskes afgrøder med dybe rødder i sædskiftet for at optage kvælstof fra dybere lag, og fordi disse afgrøder er mere tørkeresistente.

UDBYTTEEFFEKTER

De fleste forsøg, der sammenholder drænniveau med udbytteneiveau er relativt gamle (fra før 1980; Aslyng (1980), Feddes og van Wijk (1976)), og en del af dem er udført med fast grundvandsniveau. Disse forsøg viser en klar sammenhæng mellem grundvandsdybde (som indikator for de generelle jordvandsforhold) og udbytteneiveau. I igangværende forsøg med naturlige vandspejlsvariationer, er de relative ændringer i udbyttet imidlertid af samme størrelsesorden. På basis af de gamle forsøg er tommelfingerreglen, at når afdræningsdybden mindskes med 1 cm (i intervallet 1 m til 50 cm), falder udbyttet med 1 %. Den regel gælder ikke for de grovsandede jorde med mindre naturlig roddybde, men udbytterne her vil også falde, hvis roddybden mindskes. Der findes studier af effekter af deciderede oversvømmelser, men det er ikke den situation, der diskuteres her. Kvantificeringen i sommerperioden er særlig vanskelig, fordi afgrødernes sensitivitet over for vandlidende forhold varierer med vækststadiet. Generelt er forholdene omkring fremspiring og i den reproduktive fase særligt kritiske.

Årsagerne til udbyttereduktionen varierer imidlertid fra år til år. Det er veldokumenteret at udbyttereduktioner i nogle år kan kompenseres ved hjælp af kvælstofgødning (se kap. 0), hvilket tyder på, at den høje denitrifikation er en væsentlig årsag, specielt i frostfri efterår/vinter/forår. I andre år er det forsinket såning (fordi jorden er for våd til færdsel og/eller bearbejdning) eller langsom opvarmning af våd jord, der forsinket og begrænser væksten.

ANDRE EFFEKTER

Dårlig afgrødevækst giver generelt større risiko for ukrudtsproblemer og dermed til større pesticidanvendelse. Det er veldokumenteret, at risikoen for udvaskning af især sorberende pesticider stiger væsentligt, når makroporer over dræn aktiveres, og det forekommer hyppigere under dårligt drænede forhold. Risikoen for øget overfladisk afstrømning og aktivering af makroporer stiger med jordens vandindhold (f.eks. Christensen et al., 2004) og derfor stiger risikoen for transport af partikulært bundne stoffer til dræn også. Det er af betydning for udvaskning af partikulær uorganisk og organisk fosfor, der både kan transporteres gennem makroporer (i jorde med mere end ca. 5 % ler) og kan flyttes med overfladisk afstrømning. Da effekten af høj vandstand i grødesæsonen primært forventes at påvirke relativt flade arealer, er risikoen for erosion meget begrænset.

I det omfang, at ringere afdræning i grødens vækstsæson fører til øget denitrifikation i topjorden, betyder det samtidigt, at udvaskningen af nitrat vil mindskes. Det skyldes dels, at der er mindre nitrat til stede, der kan vaskes ud, og at plantens marginaloptagelse af kvælstof er lidt større, hvis forsyningen generelt er dårlig.

Begge effekter vil stige i betydning med stigende lerindhold i jorden og mere nedbør, og der er i begge tilfælde tale om, at dårligere afdræning vil føre til en øget hyppighed af kritiske situationer.

Kjærsgaard (2007) har arbejdet med udpegning af risikoområder for fosfortab fra organogene jorde til overfladevand og hun finder, at fosfortabsrisikoen er større under anaerobe end under aerobe forhold på grund af reduktion af jernforbindelser. Den anaerobe zone vil øges i sommerperioden, hvis vandstanden i vandløbet begrænser afdræningen. Imidlertid må man forvente, at den pågældende zone også vil være påvirket af en højere vintervandstand, og dermed vil de pågældende lag allerede tabe opløseligt fosfor. Strømningen mod åen vil også være større i vinterperioden. De generelle afdræningsforhold vil derfor være af størst betydning her.

DYRKNINGSMÆSSIGE ASPEKTER I ET FREMTIDIGT KLIMA

De forventede klimaændringer vil ændre rammerne for landbrugsproduktionen forskellig vis (bl.a. Olesen (2004), Olesen (2012)). Der er generel enighed om, at de højere temperaturer vil betyde, at det bliver nødvendigt at så forårsafgrøder tidligere, hvis produktionen skal opretholdes. Det skyldes, at vækstperiodens længde styres af temperatursummen i perioden, mens indstrålingen, der ikke ændrer sig, styrer den samlede produktion. Det kræver imidlertid, at jorderne tørrer op tidligere, hvilket kan blive vanskeligere med en større årlig nedbør og afstrømning efterår, vinter og forår. Vinterafgrøder sås senere længere sydpå i Europa, fordi der er en øvre grænse for hvor stor udvikling, der ønskes inden kuldeperioden, og højere temperaturer fremskynder væksten. Det vil sandsynligvis også komme til at ske i Danmark, selv om indstrålingen i efterårsperioden er mindre her. Derfor bliver afdræningsforholdene både tidligt og sent på året også mere kritiske. Ændringer i såtidspunkter betyder sandsynligvis, at efterafgrøder og mellemafgrøder bliver meget vigtige for at begrænse udvaskning mellem høst og etablering af nye afgrøder. Hyppigere ekstremhændelser i sommerperioden kan vanskeliggøre alle typer af markoperationer i sommerperioden, ikke mindst høst og etablering af efterafgrøder.

Man kan selvfølgelig forvente, at klimaændringerne også vil påvirke arts- og sortsvalget, og at det kan medvirke til at afhjælpe nogle af problemerne omkring vækstperiodens længde. Men med de givne forudsætninger er der stor risiko for, at de vådere forhold vil blive en betydelig begrænsning for dyrkning af de fleste almindelige landbrugsafgrøder, hvis ikke tilstrækkelig afdræning kan sikres.

KONKLUSION

Høj vandstand i vandløb påvirker vandstanden i de omliggende områder via formindsket grundvandsafstrømning og i drænede områder eventuelt også via oversvømmelse af drænudløb. Den største effekt af oversvømmede drænudløb sker i det område, hvor drænene er oversvømmede, men afdræningen fra de øvrige arealer i drænoplandet forsinkes også. Områder med høj (og ret konstant) grundvandsstand om sommeren er overvejende lavbundslande, men høj grundvandsstand forekommer også på højbundslande i forbindelse med våde somre og store nedbørshændelser.

Dræn (uden for okkerbelastede områder) er traditionelt designet til at have frit udløb i forhold til vandstanden i marts måned, men da dræn kan være ret gamle, kan der være sket ændringer i nedbør og vandføringsforhold efter de blev installeret. Retningslinjerne stammer fra en tid, hvor vårsæd var dominerende. Der er dokumenteret stigende afstrømning i store dele af Danmark, ligesom der er dokumenteret en nedgang i vandføringsevne for en del vandløb fra 1976 og frem. Det sandsynliggør, at de oprindelige designkriterier ikke nødvendigvis er overholdt i alle drænede områder nu. Der er ikke nogen opgørelser af, hvor mange steder drænudløb er oversvømmede i vinterperioden.

De eksisterende kriterier for dræning specificerer at drænenes udløb kun "kortvarigt" må overskrides, men "kortvarigt" er ikke defineret, hverken for sommer eller vinter. Traditionelt har forskningen især været fokuseret på forholdene om foråret (afdræning før såning), og der findes en del gamle og få nye forsøg, der belyser, at udbyttetabene i forbindelse med dårlig dræning er betydelige. Der er imidlertid ingen forskning, der belyser udbyttetab som følge af oversvømmelser i rodzonen om sommeren. Med de ovenfor beskrevne mere kritiske afdræningsforhold og en stigende risiko for intens nedbør i sommerhalvåret, er der behov for en definition af, hvor tit og hvor længe, drænudløb kan overskrides, hvis landbrugsproduktionen skal opretholdes. Det er muligt at regne på, hvor meget øget fugtighed begrænser færdsel på arealet.

Grødeskæring fører i gennemsnit til en vandstandssænkelse på knap 16 cm (6-40 cm) i en kort periode. På grund af genvækst er sænkelsen nærmere 8 cm i gennemsnit over fire uger. Effekten er gennemgående størst i vandløb med ringe fald, som vil være sammenfaldende med lavbundsområder og relativt flade og drænede højbundsarealer. Vandstandssænkninger på 10-20 cm kan have stor betydning for rodzonens udstrækning og muligheden for kørsel på arealet, såfremt drænudløbene er dykkede. Men grødeskæring af denne størrelsesorden løser ikke i sig selv de generelle problemer omkring forringede afdræningsforhold sommer og vinter. Det kræver andre virkemidler.

Figur 9 indikerer, at der er i Tokkerup-eksperimentet er en vis hyppighed af opmætning af jorden i plot 2 i august (på trods af at vandstanden i vandløbet i simuleringen er gennemsnitlig og undervurderet i forbindelse med høj nedbør), hvorfor en grødeskæring kunne have en berettigelse på dette tidspunkt. På dette tidspunkt er der også en række markoperationer med tungt maskineri. Tidspunktet for grødeskæring kan derfor måske optimeres. En generel anbefaling vil imidlertid kræve gennemregning af eksempler fra flere områder i landet med sammenhørende værdier for nedbør og vandstand.

REFERENCER

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986a): An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and Philosophy of a Physically-Based, Distributed Modelling System. *J. Hydrol.* 87, 45-59.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986b): An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: Structure of a Physically-Based, Distributed Modelling System. *J. Hydrol.* 87, 61-77.
- Abrahamsen, P og Hansen, S. (2000). Daisy: An Open Soil-Crop-Atmosphere Model. *Environmental Modelling and Software* 15.3: 313-330.
- Aslyng, H.C. (1976). Klima, jord og Planter, Kulturteknik I., 5. Udgave. DSR Forlag, Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole.
- Aslyng, H.C. (1980): Afvanding i jordbruget. Udgivet af DSR-forlag. Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole.
- Audet, J., Elsgaard, L., Kjaergaard, C, Larsen, S.E. og Hoffmann, C.C. (2013). Greenhouse gas emissions from a Danish riparian wetland before and after restoration. *Ecological Engineering* 57 (2013) 170– 182.
- Breuning-Madsen, H. (2010) Drænrørets indflydelse og betydning i et landbrugs- og miljømæssigt perspektiv. I Nielsen, M.A. Det fremmede som historisk drivkraft. Danmark efter 1742. Et festskrift til Hendes Majestæt Dronning Margrethe II ved 70-års-fødselsdagen den 16. april 2010. Udgivet af Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab.
- Cappelen, J. og Jørgensen, B.V. (2011). Dansk vejr siden 1874 – måned for måned med temperatur, nedbør og soltimer samt beskrivelser af vejret. Teknisk rapport 11-02. www.dmu.dk/fileadmin/Rapporter/TR/tr11-02.pdf og www.dmu.dk/fileadmin/Rapporter/TR/tr11-02.zip.
- Christiansen, J. S.; Thorsen, M.; Clausen, T.; Hansen, S.; Refsgaard, J. C. (2004). Modelling of macropore flow and transport processes at catchment scale. In: *Journal of Hydrology*, 2004, p. 136-158.
- Elsgaard, L. og Kandel, T. (2016). Danske resultater om dyrkning af organiske jorder. Indlæg på plantekongressen, 2016.
https://www.google.dk/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiL0Y6rhonLAhUJVSwKHSNQCROQFggBMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.landbrugsinfo.dk%2FPlanteavl%2FPlantekongress%2FFiler%2Fpl_plk2016_res_47_2_Lars_Elsgaard.pdf&usq=AFQjCNGTOgkFxT7quBRvbBkNEYISCO1gwA&sig2=jLt8Wz0-ZNAyQrNVbfB2fQ og https://www.google.dk/search?q=Danske+resultater+om+dyrkning+af+organiske+jorder&sourceid=ie7&rls=com.microsoft:da-DK:IE-Address&ie=&oe=&gws_rd=cr,ssl&ei=TcfJVvXIFcGR6ATM5L6IDQ.
- Feddes, R.A., og van Wijk, A.L.M. (1976): An integrated model-approach to the effect of water management on crop yield. *Agricultural Water Management* 1: 3-20.
- Greve, M.H., Christensen, O.D., Greve, M.B og Boukheir, R. (2014). Change in Peat Coverage in Danish Cultivated Soils During the Past 35 Years *Soil science* 179 (5): 250-257
- Davidson, E.A., Keller, M., Erickson, H.E., Verchot, L.V., og Veldkamp, E. (2000): Testing a Conceptual Model of Soil Emissions of Nitrous and Nitric Oxides. *BioScience*, 50 (8): 667-680.
- Hallema, D.W., Périard, Y., Lafond, J.A., Gumiere, S.J. og Caron, J. (2015): Characterization of Water Retention Curves for a Series of Cultivated Histosols. *Vadose Zone Journal* 14 (6). doi:10.2136/vzj2014.10.0148
- Hansen, S., Jensen, H.E., Nielsen, N.E. og Svendsen, H. (1991). Simulation of Nitrogen Dynamics and Biomass Production in Winter Wheat using the Danish Simulation model Daisy. In: *Fertilizer Research* 27, pp. 245-259.
- Hansen, S., Abrahamsen, P., Petersen, C.T. og Styczen, M. (2012). Daisy: Model use, calibration, and validation. *Trans. ASABE* 55(4): 1315-1333.
- Hansen, M.K.M. og Jensen, K.J.S. (2013). Afdræning og høstudbytter. Grundvandsdynamikkens påvirkning af udvalgte vækstfaktorer i forsøg på lerjord. Kandidatspeciale, KU.

- Henriksen, H.J., Olsen, M. og Trolborg, L. (2013). Klimaekstremvandføring. Klimaeffekter på hydrologi og afstrømning. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Rapport 2013/29. Udgivet af Naturstyrelsen.
- Iversen, H.L. og Ovesen, N.B. (1997). Vandføringsevne i danske vandløb 1976-95. 2. udgave. Faglig rapport fra DMU nr. 218. http://www2.dmu.dk/1_viden/2_Publikationer/3_fagrapporter/rapporter/FR218.pdf.
- Jensen, C.R. 1989: Dræning i jordbruget – kulturteknik III. Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole. 288 sider.
- Jensen, K.J.S (2014): Høstudbytter og plantevækstfaktorer i relation til afvandingstilstanden. 15 ECTS Pointopgave, agronomstudiet. KU.
- Karlsson, I.B., Sonnenborg, T.O. og Jensen, K.H. (2010). Hydrologiske konsekvenser af historiske og fremtidige klimatiske ændringer i Vestjylland. Perspektiv nr. 17: 32-39. <http://ojs.statsbiblioteket.dk/index.php/gfp/article/viewFile/5913/5150>
- Kjærsgaard, C. (2007). Organogene lavbundslande – Fosforstatus, binding og tabsrisiko. Intern afrapportering af delprojekt under VMPIII. Udpejning af risikoområder for fosfortab til overfladevand. Institut for Jordbrugsproduktion og Miljø, Det Jordbrugsvidenskabelige fakultet, Aarhus Universitet
- Kristensen H.L. og Thorup-Kristensen K. 2004a. Uptake and ¹⁵N labeled nitrate by root systems of sweet corn, carrot and white cabbage from 0.2-2.5 meters depth. Plant and Soil, 265:93-100.
- Kristensen H.L. og Thorup-Kristensen K. 2004b. Root growth and nitrate uptake of three different catch crops in deep soil layers. Soil Sci. Soc. Am. J. 68: 529-537.
- Kristiansen, S.M. (2012). Marken og det skadelige vand. Vand & Jord, vol.19 (4): 141-144.
- Kronvang, B., Andersen H.E., Larsen, S.E., Ovesen, N.B. og Hansen, K.M. (2006). Vil fremtidens klima føre til udtørrede bække, oversvømmede enge og stigende tab af næringsstoffer fra marker. ATVmøde. Klimaændringers betydning for vandkredsløbet. Helnan Marselis Hotel, 4. oktober 2006. http://www.atv-jord-grundvand.dk/Afholdte_moeder/061004/4%20-%20Brian%20Kronvang.pdf (accessed 23.1. 2016).
- Landbrugsministeriet (1985). Afvandingsundersøgelsen i Danmark. Arealdatakontoret.
- Larsen, S.E., Kronvang, B., Ovesen, N.B. & Christensen, O.B. 2005: Afstrømningens udvikling i Danmark. - Vand & Jord 12(1): 8-13.
- Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M.H., Albrechtsen, R., Thomsen, M., Hjelgaard, K., Hoffmann, L., Fauser, P., Bruun, H.G., Johannsen, V.K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Møller, I.S., Caspersen, O.H., Rasmussen, E., Petersen, S.B., Baunbæk, L. & Hansen, M.G. 2014. Denmark's National Inventory Report 2014. Emission Inventories 1990-2012 - Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 1214pp. Scientific Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy. <http://dce2.au.dk/pub/SR101.pdf>
- Olesen, J.E. . (2005): Climate Change and CO₂ effects on productivity of Danish agricultural systems. Journal of Crop Improvement, 13: 1-2, 257-274, http://dx.doi.org/10.1300/J411v13n01_12.
- Olesen, J.E. (2012): Klimaændringers effekter på dansk landbrug og muligheder for tilpasninger. Rekvireret af Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri, Journal nr. 811571, 9 sider. http://pure.au.dk/portal/files/52503180/Notat_klimatilpasning_130312.pdf
- Olesen, S.E.(2007). Jordtyper på lavbund. Opdeling i landbrugsarealer efter jordklasse (FK), georegion, kvartærgeologi og okkerklasse. DJF INTERN RAPPORT markbrug nr. 10 • september2007, Institut for Jordbrugsproduktion og Miljø, Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet, Aarhus Universitet. <http://pure.au.dk/portal/files/953936/intrma10.pdf>.
- Ovesen, N.B., Larsen, S.E., Schlönsen, K., Moeslund, B., Larsen, L.K. (2015): Afprøvning af forslag til metode til konsekvensvurdering af ændret vandløbsvedligeholdelse. Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 49.
- Schjønnig, P., Heckrath, G. and Christensen, B.T. Threats to soil quality in Denmark: A review of existing knowledge in the context of the EU soil thematic strategy. DJF report Plant Science no. 43, Aarhus University. 121 pp.

- Skov- og Naturstyrelsen (udateret) Vandmiljøplan II, Genopretning af vådområder. Hæfte 2: Hydrologi, stofopsætning og opmåling, afsnit 1-2. <http://www.sns.dk/landhav/vandmilplan/sns-web/haefte2/haefte2.htm#top>
- Styczen, M., Hansen, S., Jensen, L.S., Svendsen, H., Abrahamsen, P., Børgesen, C.D., Thirup, C. og Østergaard, H.S. (2004). Standardopstillinger til Daisy-modellen. Vejledning og baggrund, Version 1.1., Marts 2005. DHI Institut for Vand og Miljø, 60 pp. Tilgængelig på <http://daisy.ku.dk/about-daisy/dansk-standart/>.
- Svendsen, B.B. (2013). Dykkede dræn skaber unødigt frygt. Teknik & Miljø/ Oktober 2013: 40-41.
- Thorup-Kristensen K. 2001. Are differences in root growth of nitrogen catch crops important for their ability to reduce soil nitrate-N content, and how can this be measured? Plant and Soil, 230: 185-195.
- Thorup-Kristensen, K. (2006). Can deep roots remove the N-surplus? Indlæg på Plantekongressen, 2006 https://www.landbrugsinfo.dk/.../plk06_96_3_k_tkristensen.pdf.

APPENDIX 1: ALMINDELIGE DESIGNKRAV TIL DRÆNSYSTEMER.

Drænledningers fald vil delvis være bestemt af terrænforholdene og kan variere fra ledning til ledning. De lægges normalt i ca. 1.2 m's dybde, med en afstand, der er jordtypeafhængig, sådan at drænene ligger tættest i jorde med lille hydraulisk ledningsevne. Sideledninger lægges med et fald på mindst 3 ‰ (typisk 4-5 ‰) og hovedledninger med et fald på typisk 2-3 ‰ (i meget store hovedledninger kan accepteres ned til 1 ‰ fald) (Aslyng, 1980). Der dimensioneres normalt efter, at drænsystemet kan afdræne 1 l/s/ha (ca. 9 mm/døgn), og denne anbefaling har ikke været ændret i mindst 40 år. Normerne var baseret på 700-900 mm nedbør om året og tillod, at regnvand måtte stå oppe i pløjelaget mellem 0,5 og 2 dage pr. år. (Kristensen(2012).

I en afdræningssituation indstiller grundvandsniveauet sig med højest vandstand midt mellem drænene, se Appendix 2.

Vandet skal kunne strømme væk i drænene, og det forudsætter at vandstanden i marken er højere end ved drænets udløbspunkt. Dræn er normalt installeret med frit udløb i forhold til middelvandstanden i marts måned. Det skyldes, at man ønsker at vandet i drænene aldrig står stille, da dette fører til sedimentation af materiale. Ved frit udløb og tilstrækkelig hældning (tilstrækkelig vandhastighed i drænrørene) er drænene selvrensende. Dette er en generelt accepteret anbefaling, der også er beskrevet i f.eks. amerikanske designmanualer: "The bottom of the outlet pipe should be located above the normal water level in a receiving ditch or waterway. It is expected that floods or high water levels may submerge the outlet briefly. Drainage outlets must be kept clean of weeds, trash and rodents" (Wright and Sands, 2001).

Hvis udløbspunktet på et dræn designet til frit udløb i praksis er neddykket, vil trykforskellen, der driver strømmingen, være mindre end hvis drænet har frit udløb. Desuden er modstanden mod strømning større i et fuldt rør end i et delvist fuldt rør: Modstanden er mindst, når vanddybden i røret divideret med rørdiameteren er ca. 0,8, og stiger igen med mindre fyldningsgrader. Oversvømmelse af drænudløb i længere perioder kan føre til opstuvning af vand i oplandet, yderligere vandstandsstigning mellem drænene og sedimentation i rørene. Specielt hvis denne situation optræder i sideledninger, der er vanskelige at rense, kan hele drænsystemet blive ødelagt.

Undtagelsen til disse generelle regler er dræning i områder med risiko for okkerudfældning. Her er drænene typisk blevet lagt med udløb under vandløbets vandoverflade for at undgå tilstopning ved udfældning af okker i drænrørene.

Referencer

- Aslyng, H.(1980). Afvanding i jordbruget. Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole: DSR Forlag.
- Jensen, C.R. (1989). Dræning i jordbruget – kulturteknik III. Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole. 288 sider.
- Kristiansen, S.M. (2012). Marken og det skadelige vand. Vand & Jord, vol.19 (4): 141-144.
- Wright, J. and Sands, G. (2001) Planning an Agricultural Subsurface Drainage System. Agricultural Drainage publication series. http://irrigationtoolbox.com/ReferenceDocuments/BasicWaterManagement/drainage_system_mn.pdf

APPENDIX 2: SIMPLE, STATISKE BEREGNINGER AF GRUNDVANDSSTANDENS PLACERING UNDER FORSKELLIGE FORHOLD VED HJÆLP AF HOOGHOUDES LIGNING

Formålet med dette appendix er at belyse hvordan grundvandsspejlet vil indstille mellem vandløb og dræn i en afdræningssituation, som funktion af jordtype, nettonedbør/gennemstrømning og dybden af strømningsområdet under drænene.

HOOGHOUDES LIGNING

Hooghoudts ligning anvendes typisk ved dimensionering af drænsystemer. Ligningen estimerer afstanden, L [m], mellem parallelle dræn i en given dybde og med en given hældning. Ligningen er baseret på følgende hovedantagelser:

1. Strømningssystemet kan tilnærmes med et 2D system med stationær strømning
2. Darcy lov er gyldig
3. Jorden over drændybde er homogen og kan karakteriseres af den hydrauliske ledningsevne, K_a [m/s]
4. Jorden under drændybde er homogen og kan karakteriseres af den hydrauliske ledningsevne, K_b [m/s]
5. Strømningsområdet under drændybde kan karakteriseres af tykkelsen af et effektivt jordlag, D_e [m]

Hooghoudts ligning:

$$L^2 = \frac{8K_b D_e h_m + 4K_a h_m^2}{q} \quad (0.1)$$

Hvor h_m [m] er den lodrette afstand mellem drændybde og grundvandstand midt mellem drænene og q [m³/m²/s] er afstrømningen. D_e kan estimeres som følger (van der Molen og Wesseling, 1991):

$$D_e = \frac{1}{8} \frac{\pi L}{\ln(L/\pi r) + F(y)} \quad (0.2)$$

hvor

$$F(y) = \begin{cases} \frac{\pi^2}{4y} + \ln\left(\frac{y}{2\pi}\right) & y < 0.5 \\ \sum_{j=1}^{\infty} \frac{4 \exp((-4j+2)y)}{(2j-1)(1 - \exp((-4j+2)y))} & y \geq 0.5 \end{cases} \quad (0.3)$$

hvor

$$y = \frac{2\pi D}{L} \quad (0.4)$$

hvor r [m] er drænrørrets radius og D_e [m] er afstanden fra drændybde ned til et under drænsystemet beliggende vandstandsende lag (en aquitard). Det bemærkes at summen i ligning (0.3) konvergerer hurtigt så det er kun nødvendigt at medtage de første par led.

Under antagelse af Dupuit antagelsen (pseudo-horisontal strømning) kan Hooghoudts ligning udvikles til at beskrive grundvandstandens placering mellem drænene, h [m], som funktion af den horisontale afstand fra drænledningen, x [m]:

$$h = \sqrt{\left(\frac{K_b D_e}{K_a}\right)^2 + \frac{q}{K_a}(Lx - x^2)} - \frac{K_b D_e}{K_a} \quad (0.5)$$

Ved indsættelse af $x = L/2$ i (0.5) fås h_m og ligningen er i dette tilfælde identisk med (0.1).

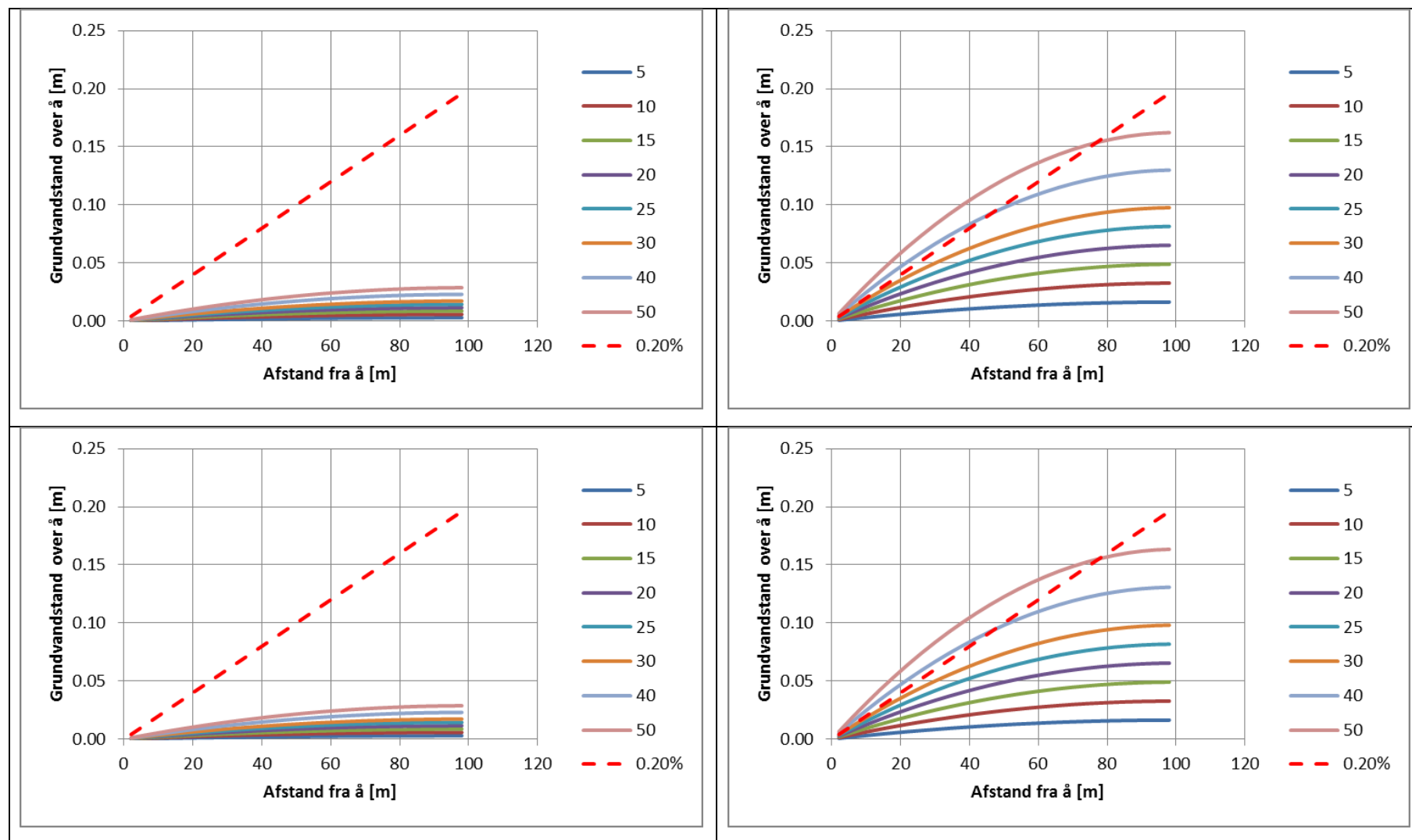
ANVENDELSE AF LIGNINGEN TIL VURDERING AF AFDRÆNING I FORHOLD TIL VANDLØB

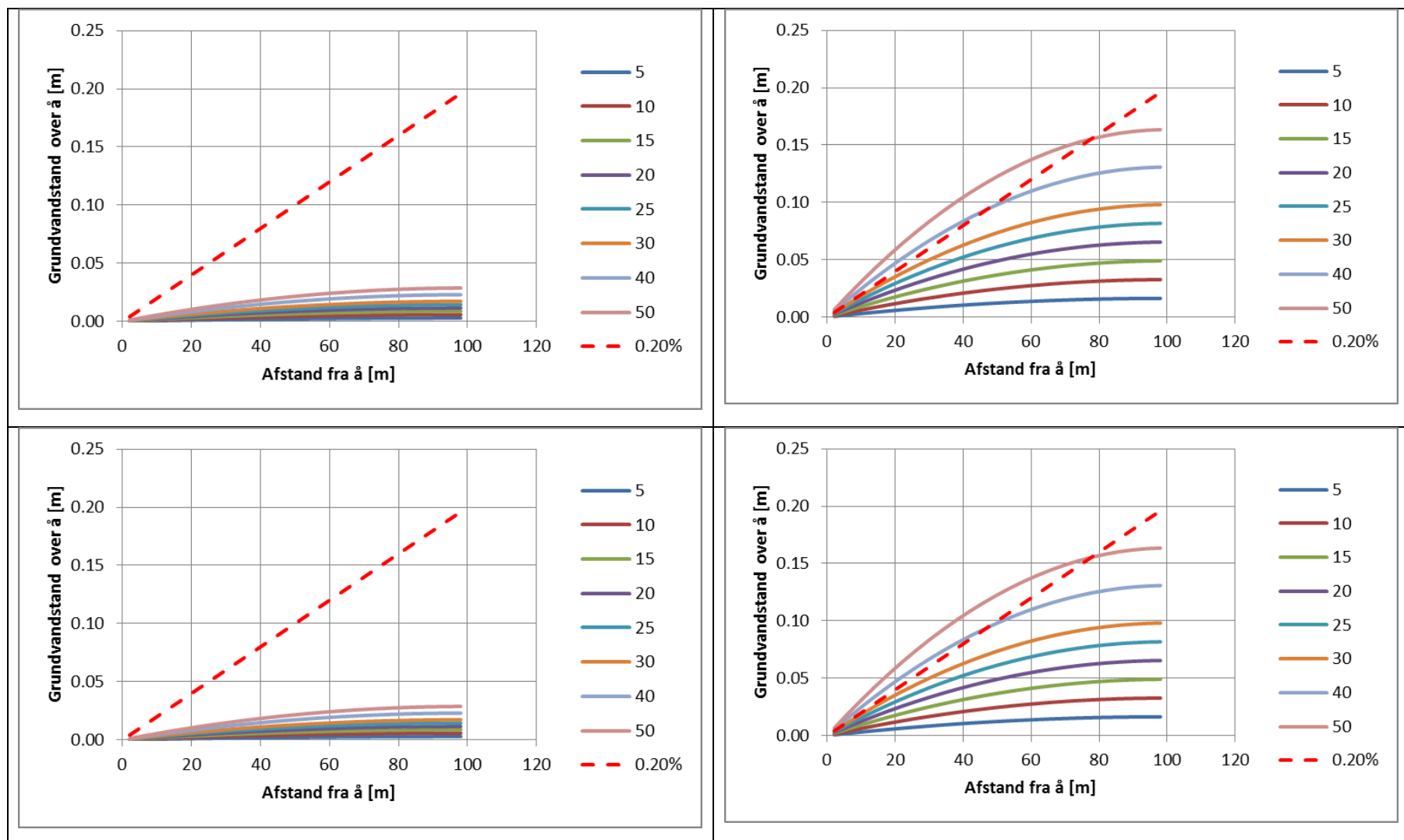
For at vurdere hvordan grundvandet vil indstille sig mellem vandløb i et område, der ikke er drænet med rør, er ligningen anvendt med en rørafstand, der skal repræsentere afstanden mellem vandløb (eller grøfter). Ligningen er implementeret i et excel-regneark, der som input kræver afstanden mellem vandløb (L), den vertikale hydrauliske ledningsevne over drænet og den horisontale ledningsevne under drænet (hhv. K_a og K_b), størrelsen på vandløb (eller drænrør), udtrykt som radius og dybden af strømningslaget (D_e) under drændybde. Beregningerne kræver et estimat af den mængde vand, der forventes at strømme igennem jorden. Regnearket beregner derefter grundvandsprofilen som funktion af strømninger fra 5-50 mm/måned, som om denne strømning var stationær. 50 mm/måned er en realistisk størrelsesorden for afstrømningen i vintermånederne, mens 5 mm pr måned nogenlunde svarer til sommerafstrømningen i østdanske vandløb. Sommerafstrømningen i Vestdanmark vil normalt være større.

Tabel 1 i hovedrapporten viser, at en betydelig del af lavbundsjordene har sandet geologi. I det følgende er gennemregnet situationer, der svarer til de typiske forhold i kombinationer af JB1, JB2, JB3 og JB4-teksturer over drænet og en sandet geologi. Tabel 2.1 viser den anvendte parameterisering. Der er valgt to meget forskellige værdier for D_e , da denne parameter er dårligst defineret. De hydrauliske ledningsevner for den umættede zone stammer fra

TABEL 2.1. PARAMETERISERING AF BEREGNINGSEKSEMPLER. K_b FOR SAND SVARER TIL DEN HORISONTALE LEDNINGSEVNE FOR SAND ANVENDT FOR DE ØVERSTE 3 M I DK-MODELLERNE FOR NORDJYLLAND, MIDTJYLLAND OG FYN. DE VERTIKALE MÆTTEDE HYDRAULISKE LEDNINGSEVNER I C-HORISONTER (HORISONTER MED UDBREDELSE FRA 100 CM DYBDE) ER MEDIANVÆRDIER FOR JORDBUNDS-PARAMETRENE ER OPGJORT UD FRA JB-NUMMERET. DATA STAMMER FRA JORDPROFILDATABASEN V. DANMARKS JORDBRUGSFORSKNING. DE TILHØRENDE PARAMETRE ER GENERERET MED HYPRES (WÖSTEN ET AL., 1998). KILDE: STYCZEN ET AL. (2004), APPENDIX (TABEL A4.1c)

Generelle parametre	L , m	R , cm	D_e , m	K_b , cm/dag
	200	60	90 og 3	1728
Hydraulisk ledningsevne over drænene	JB1	JB2	JB3	JB4
K_a , cm/dag	97	55	29	25





FIGUR 2.1. BEREGNEDE GRUNDVANDSPROFILER FOR JORDTYPERNE JB1-4 (OPPEFRA OG NED) PÅ EN SANDET GEOLOGI, PARAMETERISERET SOM VIST I TABEL 2.1. I VENSTRE KOLONNE ER $D_e = 90\text{m}$, I HØJRE KOLONNE ER $D_e = 3\text{m}$.

Styczen et al. (2004), mens de horisontale ledningsevner er baseret på kalibrerede værdier fra DK-modellerne for Nordjylland, Midtjylland og Fyn (Højbjerg et al., 2010 a, b og, Trolborg et al., 2010).

Beregningerne viser, at afstrømningsforholdene er helt domineret af den sandede geologi, og selv med en strømningsdybde, der er begrænset til 3 m, stiger grundvandsstanden mellem åer eller grøfter kun lidt, både i en vintersituation og en sommersituation. Når effekten af en vandstandsstigning i et vandløb skal ekstrapoleres til arealet mellem vandløb, er den altså maksimalt få promille. Sådanne jorder drænes normalt ikke med drænrør.

I Tabel 1 i hovedrapporten er specielt JB3-4 og JB5-6 samt JB11 (humusjorde) kombineret med forekomst af tørv og gytje. Disse kombinationer er derfor undersøgt i det følgende. Parameteriseringen er vist i tabel 2.2. De repræsenterer nu henholdsvis 20 m og 3 m, da 90 m tørv virker urealistisk. Der er betydelig forskel på estimatet for den hydrauliske ledningsevne af tørv i de tre Danmarksmodeller (Nordjylland, Midtjylland og Fyn), hvorfor den største og mindste værdi er repræsenteret her.

TABEL 2.2. PARAMETRE FOR BEREKNINGSEKSEMPLER. K_b FOR TØRV SVARER TIL DEN HORISONTALE LEDNINGSEVNE FOR TØRV ANVENDT FOR DE ØVERSTE 3 M I DK-MODELLERNE FOR NORDJYLLAND, MIDTJYLLAND OG FYN. DE VERTIKALE MÆTTEDE HYDRAULISKE LEDNINGSEVNER I C-HORISONTER (HORISONTER MED UDBREDELSE FRA 100 CM DYBDE) ER MEDIANVÆRDIER FOR JORDBUNDS-PARAMETRENE ER OPGJORT UD FRA JB-NUMMERET FOR JB 4-6. VÆRDIEN FOR JB11 STAMMER FRA HALLEMA ET AL. (2015). DATA STAMMER FRA JORDPROFILDATABASEN V. DANMARKS JORDBRUGSFORSKNING. DE TILHØRENDE PARAMETRE ER GENERERET MED HYPRES. KILDE: STYCZEN ET AL. (2004), APPENDIX (TABEL A4.1c).

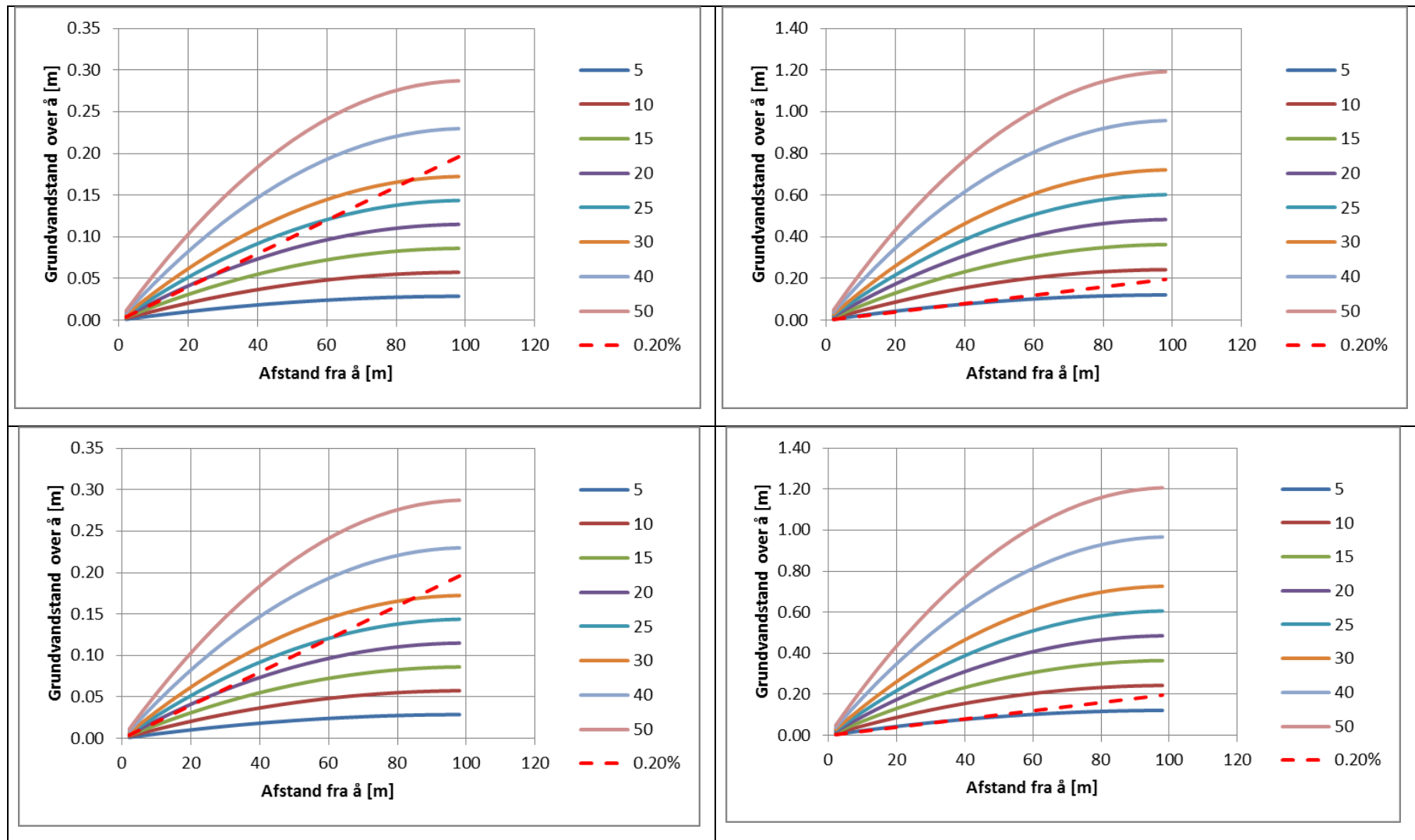
Generelle parametre	L, m	R, cm	D_e , m	K_b , cm/dag
	200	60	20 og 3	17,3-232
Hydraulisk ledningsevne over drænene	JB4	JB5	JB6	JB11
K_a , cm/dag	25	11	15	13

Kun resultater for JB4 og JB5 er vist i Figur 2.2, da de repræsenterer spændet i vertikale ledningsevner for de 4 jordtyper. Figuren viser beregninger med en stor ledningsevne i tørv (232 cm/dag). Igen domineres resultaterne af betydningen af den underliggende geologi. I situationen med et dybt strømningslag er opstuvningen mellem vandløb stadig begrænset, selv i vintersituationen. Er strømningslaget tyndt (3m), bliver opstuvningen i vintersituationen dog betydelig og jorderne ville i praksis være drænet, hvis de anvendes til landbrug. Om sommeren fører en gennemsnits-afstrømning på 5-10 mm/måned dog stadig kun til en gennemsnitlig opstuvning svarende til et par promille.

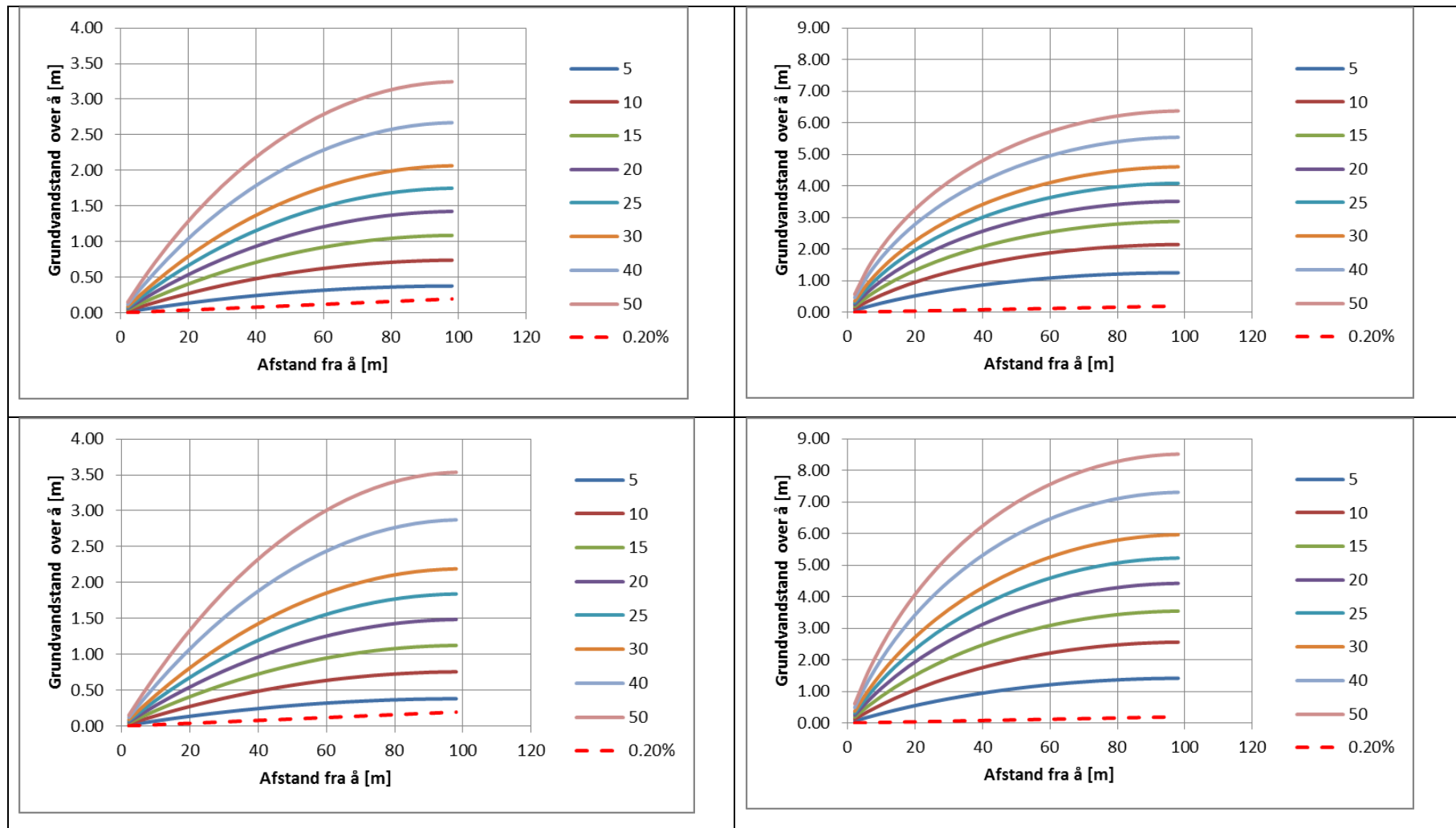
Resultaterne viser, at for en stor del af lavbundsjorderne, hvor geologien er sand eller tykke tørvslag med stor høje ledningsevner, er afdræningen ret uproblematisk, og opstuvningen mellem dræn ret begrænset.

Figur 2.3 viser, at hvis ledningsevnen i den underliggende tørv er lav, bliver effekten af ledningsevnen i jorden over drænet vigtigere. Opstuvningen af vand i profilet vil være betydelig, og jordene vil være dræned, hvis de anvendes til landbrug. I naturlig tilstand vil de fremstå meget våde.

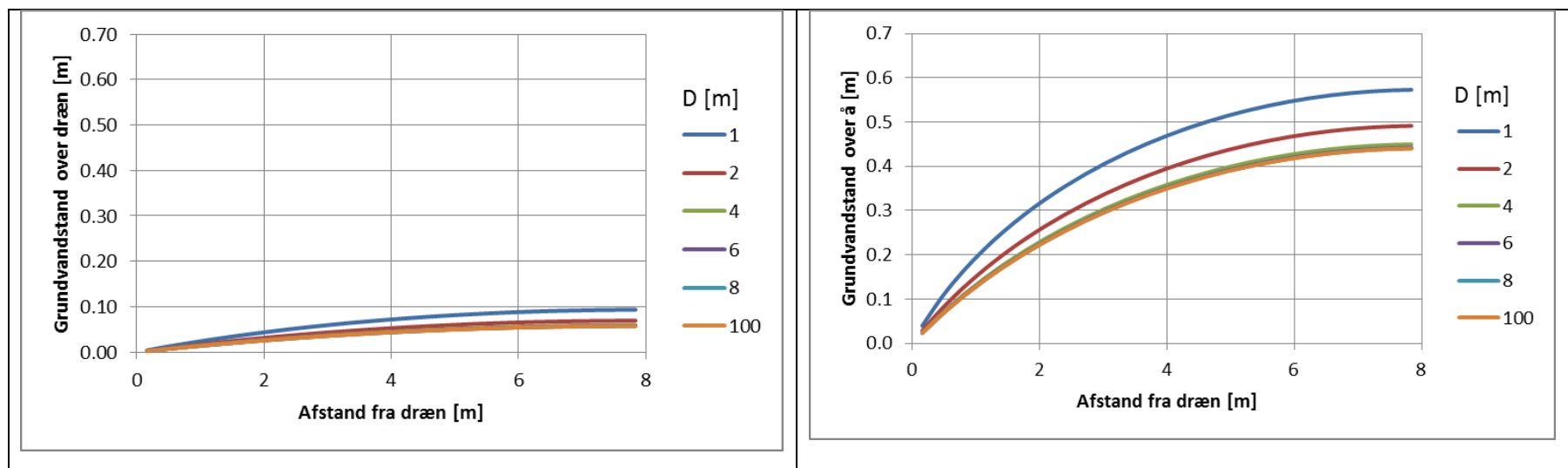
Indsættes der dræn i denne, ret dårligt afdræned jord, vil vandstanden mellem dræn (lagt med 16 m's afstand) indstille sig som vist i Figur 2.4, beregnet for afstrømningerne 5 mm/måned og 50 mm/måned. I drænberegningen har tykkelsen af det lag, vandet har mulighed for at strømme igennem (D_e) mindre betydning. I sommersituationen vil jorden være veldrænet, mens jorden mellem drænene stadig vil være ret våd i vintersæsonen, selv om der er drænet.



FIGUR 2.2. BEREGNEDE GRUNDVANDSPROFILER FOR JORDTYPERNE JB4 OG 5 (OPPEFRA OG NED) PÅ TØRV, PARAMETERISERET MED EN HYDRAULISK LEDNINGSEVNE PÅ 232 M/DAG SOM VIST I TABEL 2.2. I VENSTRE KOLONNE ER $D_e = 20\text{m}$, I HØJRE KOLONNE ER $D_e = 3\text{m}$.



FIGUR 2.3. BEREGNEDE GRUNDVANDSPROFILER FOR JORDTYPERNE JB4 OG 5(OPPEFRA OG NED) PÅ TØRV, PARAMETERISERET MED EN HYDRAULISK LEDNINGSEVNE PÅ 17,3 M/DAG SOM VIST I TABEL 2.2. I VENSTRE KOLONNE ER $D_e = 20$ M, I HØJRE KOLONNE ER $D_e = 3$ M.



FIGUR 2.4. FORDELING AF GRUNDVANDSSTANDEN MELLEM DRÆN LAGT MED 16 M'S AFSTAND BEREGNET MED PARAMETERISERINGEN BESKREVET I TABEL 2.2 FOR EN JB5 OG EN HYDRAULISK LEDNINGSEVNE I TØRVEN PÅ 17.3 CM/DAG. TIL VENSTRE BEREGNET FOR EN GENNEMSITLIG AFSTRØMNING PÅ 5 MM/MÅNED, TIL HØJRE FOR 50 MM/MÅNED.

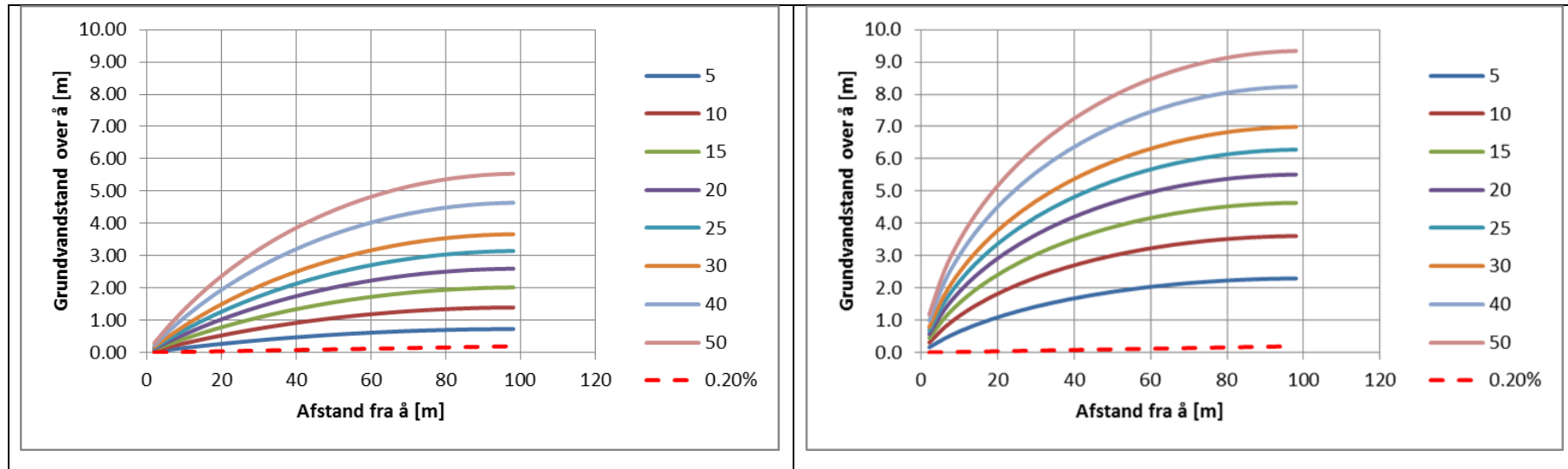
Der er et meget stort spænd i estimaterne af den horisontale ledningsevne i moræneler. Det skyldes at moræneler kan være blandet med andre materialer, f.eks sandlinser, der lokalt har meget højere ledningsevne, og det kan være opsprækket. I Danmarksmodellen for Nordjylland anvendes en værdi på 145 cm/dag, som er sammenlignelig med den høje ledningsevneværdi for tørv for de øverste 3 m ler, mens estimatet i Danmarksmodellen for Fyn er ca. 3.5 cm/dag. Lerlag dybere i jorden tillægges en værdi, der er ca. en dekade mindre, hvilket i praksis betyder, at de er meget lidt strømningsaktive, og at vandet i praksis bevæger sig horisontalt over disse lag.

TABEL 2.2. PARAMETRE FOR BEREKNINGSEKSEMPLER. K_b FOR MORÆNELER SVARER TIL DEN HORIZONTAL LEDNINGSEVNE FOR LER ANVENDT FOR DE ØVERSTE 3 M I DK-MODELLEN FOR MIDTJYLLAND. DE VERTIKALE MÆTTEDE HYDRAULISKE LEDNINGSEVNE I C-HORISONTER (HORISONTER MED UDBREDELSE FRA 100 CM DYBDE) ER MEDIANVÆRDIEN FOR JORDBUNDSPARAMETRENE ER OPGJORT FOR JB6. DATA STAMMER FRA JORDPROFILDATABASEN V. DANMARKS JORDBRUGSFORSKNING. DE TILHØRENDE PARAMETRE ER GENERERET MED HYPRES (WÖSTEN, 1998). KILDE: STYCZEN ET AL. (2004), APPENDIX (TABEL A4.1c).

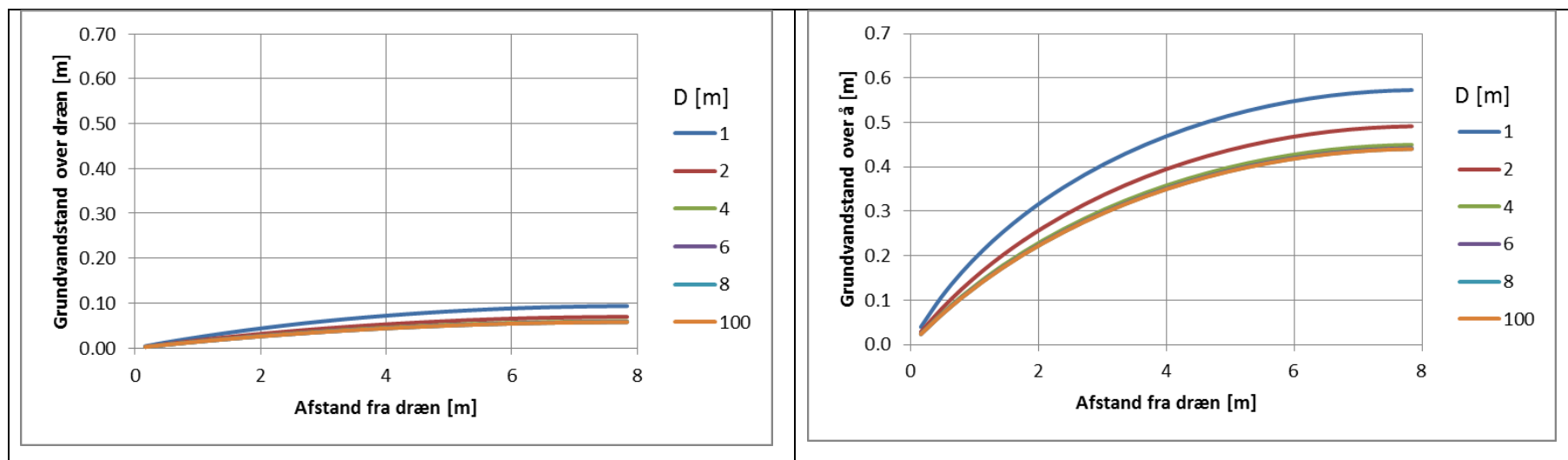
Generelle parametre	L, m	R, cm	D_e , m	K_b , cm/dag
	200	60	20 og 3	6,5
Hydraulisk ledningsevne over drænene			JB6	
K_a , cm/dag			15	

Figur 2.5 viser en endnu kraftigere grundvandsgradient i udrænede lerjorde som følge af den lave horisontale ledningsevne, end hvad der er tilfældet i de tidligere eksempler. Hvis topografien tillader det, vil grundvandet altså svinge mange meter mellem en vinter- og en sommersituation. Om vinteren vil jorderne fremstå meget våde. I den drænede version (Figur 2.6) er resultaterne næsten identiske med beregningen for tørv. Under drænene er det stadig afdræningen til det nærliggende vandløb, der styrer afdræningsprocessen. Den høje vandstand over drænet i vinterperioden kan sammenlignes med målinger og simuleringer vist i hovedrapportens Figur 6.

Større afstand mellem vandløb eller dræn giver anledning til endnu større opbygning af tryk mellem dem.



FIGUR 2.5. BEREGNEDE GRUNDVANDSPROFILER FOR JORDTYPEN JB5 PÅ MORÆNELER, PARAMETERISERET SOM VIST I TABEL 2.3. I VENSTRE KOLONNE ER $D = 90\text{m}$, I HØJRE KOLONNE ER $D = 3\text{ m}$.



FIGUR 2.6. FORDELING AF GRUNDVANDSSTANDEN MELLEM DRÆN LAGT MED 16 M'S AFSTAND BEREGNET MED PARAMETERISERINGEN BESKREVET I TABEL 2.3 FOR EN JB6 OG EN HYDRAULISK LEDNINGSEVNE I MORÆNELER PÅ 6,5 CM/DAG. TIL VENSTRE BEREGNET FOR EN GENNEMSITLIG AFSTRØMNING PÅ 5 MM/MÅNED, TIL HØJRE FOR 50 MM/MÅNED.

Referencer:

- Hallema, D.W., Périard, Y., Lafond, J.A., Gumiere, S.J. og Caron, J. (2015): Characterization of Water Retention Curves for a Series of Cultivated Histosols. *Vadose Zone Journal* 14 (6). doi:10.2136/vzj2014.10.0148
- Højbjerg, A.L., Nyegaard, P., Stisen, S., Troldborg, L., Ondracek, M og Christensen, B.S.B. (2010). DK-model2009. Modelopstilling og kalibrering for Midtjylland. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Rapport 2010/78.
- Højbjerg, A.L., Ondracek, M., Nyegaard, P., Troldborg, L., Stisen, S., og Christensen, B.S.B. (2010). DK-model2009. Modelopstilling og kalibrering for Midtjylland. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Rapport 2010/79.
- Styczen, M., Hansen, S., Jensen, L.S., Svendsen, H., Abrahamsen, P., Børgesen, C.D., Thirup, C. og Østergaard, H.S. (2004). Standardopstillinger til Daisy-modellen. Vejledning og baggrund, Version 1.1., Marts 2005. DHI Institut for Vand og Miljø, 60 pp. Tilgængelig på <http://daisy.ku.dk/about-daisy/dansk-standart/>.
- Troldborg, L., Højbjerg, A.L., Nyegaard, P., Stisen, S. og Christensen, B.S.B. (2010). DK-model2009. Modelopstilling og kalibrering for Midtjylland. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Rapport 2010/76.
- Van der Molen, W.H., and J. Wesseling (1991). A solution in closed form and series solution to replace the tables for the thickness of the equivalent layer in Hooghoudts drain spacing formula. *Agric. Water Manage.*, 19, 1-16.
- Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A. and Le Bas, C. (1998): Using existing soil data to derive hydraulic parameters for simulation models in environmental studies and in land use planning. Final Report of the European Union Funded Project., Report 156, DLOstaring Centre, Wageningen.